



UNIVERSIDADE DO VALE DO TAQUARI - UNIVATES  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO *STRICTO SENSU*  
MESTRADO EM SISTEMAS AMBIENTAIS SUSTENTÁVEIS

**AVALIAÇÃO ENERGÉTICA DO BIOGÁS COM DIFERENTES  
PERCENTUAIS DE METANO NA PRODUÇÃO DE ENERGIA  
TÉRMICA E ELÉTRICA**

Ricardo Dalpaz

Lajeado, Maio de 2019.

Ricardo Dalpaz

**AVALIAÇÃO ENERGÉTICA DO BIOGÁS COM DIFERENTES  
PERCENTUAIS DE METANO NA PRODUÇÃO DE ENERGIA  
TÉRMICA E ELÉTRICA**

Dissertação Programa de Pós-Graduação em  
Sistemas Ambientais Sustentáveis, da  
Universidade do Vale do Taquari - Univates,  
como parte da exigência para obtenção do grau  
de Mestre em Sistemas Ambientais  
Sustentáveis.

Orientador: Prof. Dr. mont. Odorico Konrad  
Coorientador: Prof. Dr. Carlos Cândido da Silva  
Cyrne

Lajeado, Maio de 2019.

# **AVALIAÇÃO ENERGÉTICA DO BIOGÁS COM DIFERENTES PERCENTUAIS DE METANO NA PRODUÇÃO DE ENERGIA TÉRMICA E ELÉTRICA**

Ricardo Dalpaz

A banca examinadora aprova a Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Sistemas Ambientais Sustentáveis, da Universidade do Vale do Taquari UNIVATES, como parte da exigência para obtenção do grau de Mestre em Sistemas Ambientais Sustentáveis.

## **BANCA EXAMINADORA**

---

Prof. Dr. mont. Odorico Konrad - Orientador  
Universidade do Vale do Taquari UNIVATES

---

Prof. Dr. Carlos Cândido da Silva Cyrne –Coorientador  
Universidade do Vale do Taquari UNIVATES

---

Dr. Alexandre André Feil  
Avaliador 1

---

Dr. Eduardo Miranda Ethur  
Avaliador 2

---

Dra. Simone Stulp  
Avaliador 3

Lajeado- RS, Lajeado, Maio de 2019.

*Dedico este trabalho às pessoas  
mais importantes de minha vida:  
meus pais, meu irmão e minha namorada.*

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a todos que contribuíram de alguma forma para a realização desta pesquisa. Agradeço a Deus pelas oportunidades e vivências maravilhosas nesta etapa de estudo. Sou grato aos professores do PPGSAS, que, no decorrer desta caminhada, com palavras de apoio e incentivo, com orientações e ideias, foram essenciais para que eu conseguisse trilhar este caminho com motivação e sucesso, permitindo meu crescimento pessoal e profissional.

Aos meus pais, Gelso Dalpaz e Maria Salete Nunes Dalpaz, que são meus maiores exemplos e porto seguro, sempre me incentivando e aguentando os momentos de estresse. Agora poderemos aproveitar mais momentos juntos.

Ao Professor Dr. mont. Odorico Konrad, pela competência, atenção, paciência, e por estar, sempre que precisei, disponível para ajudar, incentivando novas descobertas e conhecimentos a cada segundo, além de compartilhar seu conhecimentos comigo.

Ao Professor Coorientador Dr. Carlos Cândido da Silva Cyrne pela colaboração neste trabalho, pelo incentivo na busca por novos conhecimentos, por sua competência e por transmitir sua inteligência de maneira compreensível.

Agradeço a todos os integrantes da equipe do Laboratório de Biorreatores da Univates, por estarem sempre disponíveis e auxiliando quando precisei.

Enfim, gratidão a todos que, de alguma forma, ofereceram-me palavras de carinho, apoio, incentivo. Vocês me incentivaram e apoiaram em um momento muito importante de minha vida.

## RESUMO

A energia figura entre as demandas mais importantes para a sustentação e o desenvolvimento de atividades produtivas e da sociedade como um todo. O biogás é uma energia de origem renovável com grande potencial de produção e aproveitamento, podendo absorver uma parcela significativa das demandas energéticas mundiais. Com possibilidades de sua utilização para: produção de eletricidade, aquecimento ou como combustível veicular. Além disso, o aproveitamento energético do biogás colabora para a redução nas emissões de gases efeito estufa, deixando de ser passivo ambiental para um ativo ambiental, social e econômico. Este estudo objetivou avaliar o desempenho do biogás produzido em uma planta piloto, com diferentes percentuais de metano em sua composição, utilizado na cogeração de energia. Procurou-se identificar se os gastos energéticos despendidos com o processo de purificação compensam a eficiência energética obtida a partir da conversão do biogás em energia térmica e elétrica. Para tanto, foram realizadas três avaliações, nas quais foi utilizado um trocador de calor acoplado ao escapamento do motor a combustão para mensurar a quantidade de energia térmica proveniente dos gases de escape do motor, e para quantificar a energia elétrica, utilizado um gerador elétrico de 60 kVA de potência nominal interligado ao motor. Dessa forma, no primeiro teste com biogás a 68,54% CH<sub>4</sub>, obteve-se a geração de 2,04 kWh/m<sup>3</sup> de energia elétrica, 1,15 kWh/m<sup>3</sup> de energia térmica, com eficiência de 51,45%. O segundo teste com biogás em 83,46% CH<sub>4</sub> alcançou geração de 3,21 kWh/m<sup>3</sup> de energia elétrica, 1,57 kWh/m<sup>3</sup> de energia térmica, com eficiência de 51,17%. Em um terceiro teste com biogás numa concentração de 92,33% CH<sub>4</sub>, atingiu-se uma geração de 3,57 kWh/m<sup>3</sup> de energia elétrica e 1,67 kWh/m<sup>3</sup> de energia térmica, obtendo eficiência de 53,96%. Dessa forma, os resultados de geração elétrica corroboram com o que foi encontrado na literatura, porém, para geração de energia térmica não foram os resultados

esperados, devido ao trocador de calor ter algumas inconformidades como material de construção ser de baixa condutibilidade térmica.

**Palavras-chave:** Energia renovável. Biomassa. Biogás. Metano. Cogeração.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Composição da matriz energética mundial 2017.....	20
Figura 2 – Participação de cada fonte na matriz energética Brasileira 2017.....	20
Figura 3 – Principais fontes que formam a matriz elétrica mundial 2017.....	23
Figura 4 – Participação de cada fonte na matriz elétrica Brasileira 2017.....	24
Figura 5 – Purificação de biogás por membrana .....	33
Figura 6 – Processo de purificação de biogás por com separação criogênica .....	34
Figura 7 – Purificação de biogás por adsorção com modulação de pressão .....	36
Figura 8 – Perdas e aproveitamento da energia de motores de combustão interna .....	42
Figura 9 - Trocador de calor com fluxo contracorrente.....	43
Figura 10 – Planta piloto de biogás que integra a estrutura do CEBER .....	47
Figura 11 – Reservatório para armazenagem de biomassa.....	48
Figura 12 – Reator para produção de biogás .....	49
Figura 13 – Medidor de vazão Ritter .....	50
Figura 14 – Gasômetro para armazenagem do biogás produzido .....	51
Figura 15 – Flare utilizado para na queima de biogás excedente .....	52
Figura 16 – Dessulfurizador de biogás .....	53
Figura 17 – Central de purificação por adsorção com modulação de pressão (PSA) .....	54
Figura 18 – Analisador portátil Biogás 5000 (Geotech) .....	55



Figura 19 – Rotâmetro para medir vazão do biogás .....	56
Figura 20 – Motogerador a biogás com trocador de calor.....	57
Figura 21 – Pontos de monitoramento para a quantificação de energia térmica	58
Figura 22 – Representação gráfica do caminho que percorrido pelo biogás .....	60
Figura 23 – Representação gráfica da avaliação para o cenário I .....	61
Figura 24 – Representação gráfica da avaliação para o cenário II e III .....	62

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Levantamento de dados da pesquisa .....	60
Tabela 2 – Valores do PCI em relação a composição do biogás .....	63
Tabela 3 – Resultados dos três estágios de purificação do biogás no trabalho..	66
Tabela 4 – Produção de energia elétrica alcançada em cada teste realizado....	67
Tabela 5 – Consumo de biogás em cada teste.....	67
Tabela 6 – Comparação da produção de energia térmica gerada em cada pelo trocador de calor em cada teste.....	68
Tabela 7 – Potencial de energia contida no biogás em cada teste.....	69
Tabela 8 – Energia utilizada pela planta piloto e energia utilizada pelo sistema....	70
Tabela 9 – Avaliação do potencial de energia no biogás em cada teste.....	71
Tabela 10 – Geração de energia elétrica com diferentes motores.....	73
Tabela 11 – Relação de energia elétrica entre este trabalho e outros autores.....	74
Tabela 12 – Proporção de metano e potencial de energia em cada teste.....	75
Tabela 13 – Eficiência na geração de energia elétrica com biogás.....	76
Tabela 14 - Eficiência na geração de energia elétrica com biogás.....	77

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABRAF	Associação Brasileira de Agricultores de Floresta Plantada
ANEEL	Agencia Nacional de Energia Elétrica
ANP	Agência Nacional do Petróleo
CEBER	Centro de Estudos de Biogás e Energias Renováveis
CH <sub>4</sub>	Metano
CNI	Confederação Nacional das Indústrias
CO <sub>2</sub>	Dióxido de Carbono
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
ETE	Estação de Tratamento de Efluentes
FEAM	Fundação Estadual do Meio Ambiente
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Óxido de Ferro (III)
Fe <sub>2</sub> S <sub>3</sub>	Sulfeto de Ferro (III)
GEE	Gases de Efeito Estufa
GLP	Gás Liquefeito de Petróleo
GN	Gás Natural
GW	Gigawatt
H <sub>2</sub> S	Sulfeto de Hidrogênio
ICLEI	Manual de Aproveitamento do Biogás
IEA	International Energy Agency – Agencia Internacional de Energia
MCI	Motores de Combustão Interna
MMA	Ministério do Meio Ambiente

MW	Megawatt
PCI	Poder Calorífico Inferior
PROINFA	Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica
PSA	Adsorção com Modulação de Pressão

## SUMÁRIO

<b>LISTA DE FIGURAS .....</b>	<b>8</b>
<b>LISTA DE TABELAS .....</b>	<b>10</b>
<b>LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS .....</b>	<b>11</b>
<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>15</b>
1.1 Objetivos .....	18
1.1.1 Objetivo Geral .....	18
1.1.2 Objetivos Específicos .....	18
<b>2 REFERENCIAL TEÓRICO .....</b>	<b>19</b>
2.1 A energia como produto fundamental na sobrevivência e existência dos seres vivos e a matriz energética .....	19
2.2 Políticas sobre energias renováveis .....	28
2.3 Biogás e Processos de Purificação .....	30
2.3.1 Processo de purificação por membranas .....	33
2.3.2 Processo de purificação criogênica .....	35
2.3.3 Processo de purificação com água pressurizada .....	36
2.3.4 Processo de purificação biológica .....	36
2.3.5 Processo de adsorção com modulação de pressão .....	37
2.4 Energia elétrica a partir do biogás e cogeração de energia .....	38
2.4.1 Motores de combustão interna .....	41
2.4.2 Trocadores de calor .....	43
2.4.3 Transformação de energia térmica em energia elétrica .....	45
<b>3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS .....</b>	<b>47</b>
3.1 Caracterização da pesquisa .....	47
3.2 Caracterização da área de estudo .....	48
3.3 Coleta dos dados .....	60
3.4 Equações utilizadas para as averiguações dos testes .....	63
<b>4 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS .....</b>	<b>65</b>

4.1 Resultado da etapa de purificação do biogás em três concentrações de CH <sub>4</sub>	65
4.2 Resultado da geração de energia elétrica no motogerador em três condições de metano no biogás .....	66
4.3 Resultado da geração de energia térmica com percentuais diferentes de metano no biogás .....	68
4.4 Relação da eficiência na geração de energia elétrica e térmica gerada em cada teste realizado com biogás .....	69
4.5 Discussão dos resultados .....	72
<b>5 CONCLUSÃO .....</b>	<b>80</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>82</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento da humanidade está associado basicamente à demanda de energia. O homem a utiliza desde suas necessidades primárias para sobrevivência, até para sua comodidade de conforto social e bem estar. No entanto, quando se fala de energia, é possível partir de um produto ou trabalho, para sua origem, e levar a uma fonte com maior aplicação global, como o petróleo, um combustível fóssil Delgado (2016).

Na economia das nações, o petróleo, que até os anos 80 destacava-se como abundante, hoje é debatido por seu esgotamento e respectivo poder ambientalmente nocivo, sendo protagonista desses fatores pela sua majoritária contribuição na matriz energética. Souza (2006) destaca que o petróleo já havia dado sinais de instabilidade comercial nos anos 70, com uma crise que fez despertar o mundo todo para a busca de outras possibilidades em fontes de energia.

Além do mais, o  $\text{CH}_4$  existente no biogás é na faixa de 21 vezes mais prejudicial que o  $\text{CO}_2$ , sendo esses os maiores concentradores de gases de efeito estufa, em consequência da disposição de resíduos orgânicos. Desse modo, existe a possibilidade de aproveitamento energético desse biogás, aliando contribuição ambiental com geração de energia elétrica renovável Canever (2017).

Entretanto, a Empresa de Pesquisa Energética (BRASIL, 2017a) enfatiza que no Brasil a matriz energética para geração de energia elétrica é predominantemente de fonte hidráulica, fonte renovável que coloca o Brasil como um dos maiores produtores de eletricidade renovável. Outra fração em destaque é a produção de

etanol, originado da cana-de-açúcar, que tem utilização pura ou em mistura com a gasolina.

Em contrapartida, Genovese et al. (2006) evidenciam o abundante avanço do potencial da biomassa, sendo um recurso renovável derivado de qualquer matéria orgânica e que, pelo aspecto energético, surge como possibilidade de utilização como fonte de energia. Essa biomassa pode ser residual de efluentes nas produções rurais, agroindustriais e urbanas, sendo obtida de restos de colheitas, efluentes domésticos e industriais, bem como esterco animal. Coldebella (2006) menciona que, se não houver um tratamento adequado, tais resíduos viram potenciais poluidores ambientais, mas, se for realizado um manuseio correto, tem-se uma potencial fonte de energia pela produção do biogás e também, como subproduto, o biofertilizante.

Utilizando o método de fermentação anaeróbica no tratamento desses resíduos, Pecora (2006) descreve que, além de tudo, está sendo possível agregar valor a um produto energético – no caso, o biogás –, obtendo o biofertilizante e colaborando para uma maior agilidade de recuperação dos investimentos na tecnologia instalada.

Apresentado por Konrad et al. (2016), alguns exemplos de onde é possível aproveitar esse biogás são a queima diretamente em aquecedores, fogões e caldeiras, a produção de energia elétrica e térmica por meio de motogeradores ou turbinas a vapor e, ainda, a possibilidade de utilização como combustível veicular após um tratamento de purificação e retirada de impurezas.

Diante do supracitado e colaborando com tais ideias, Coldebella (2006) menciona que as fontes alternativas de energia estão crescendo dia após dia, tendo uma magnitude de determinar consumo de biogás por kWh de energia produzida e, assim, analisar possibilidades de otimização e redução de custos para a produção de energia Canever (2017).

É nesse contexto que se insere esta pesquisa, cuja proposta foi realizar uma análise técnica da eficiência do aproveitamento energético do biogás, com distintos percentuais de metano, utilizado para a produção de energia térmica e elétrica (cogeração) na planta piloto de biogás do Centro de Estudos de Biogás e Energias



Renováveis (CEBER) do Parque Científico e Tecnológico da UNIVATES (TECNOVATES).

Esta pesquisa tem como tema a avaliação da eficiência energética de biogás com características distintas de metano em sua composição, na produção de energia térmica e elétrica (cogeração). O problema que embasou esta análise foi que maiores teores de metano presentes no biogás ampliam o seu poder calorífico, resultando em um maior potencial de produção de energia, possível de ser obtida a partir deste combustível renovável. A problemática centra-se em: “quais cenários de purificação (teor de biometano) e produção de energia térmica e elétrica, por meio do biogás dessulfurizado ou purificado, podem ser aceitáveis tecnicamente, considerando o consumo de energia na transformação energética no processo de purificação?”.

O biogás é colocado como uma fundamental estratégia no combate à diminuição dos gases de efeito estufa, aliado na autossuficiência da matriz energética, mantendo um desenvolvimento ambientalmente correto e agregando valores na economia e nas sociedades. Além disso, de acordo com Silva (2017), a possibilidade da conversão de biomassas residuais em energia contribui para a transformação de passivos ambientais em ativos econômicos, promovendo a produção de biogás como uma prática de geração de biocombustível sustentável.

A complexidade do sistema de purificação do biogás, bem como os custos envolvidos, está diretamente relacionada ao aproveitamento energético a ser implementado (FEAM, 2015). Porém, apenas remoção do  $H_2S$  já oferece condições para o seu aproveitamento como fonte de energia elétrica, visto que os equipamentos desenvolvidos para tal operam com teores a partir de 45% de metano e o gasto para a purificação em teores maiores de metano nem sempre compensa o ganho energético obtido. A ausência de avaliações e descrições detalhadas do processo de geração de biogás com seu aproveitamento na cogeração, em diferentes características de composição, é entrave na difusão dessa tecnologia e é nesse sentido que o presente estudo buscou contribuir, apontando os cenários construídos a partir das avaliações propostas nesta pesquisa.

Com este estudo, buscou-se, além da formação profissional, contribuir para a elaboração de uma proposta que aponte possibilidades de uso de biomassa para a

geração alternativa de energia e que conscientize produtores rurais e empresas sobre a necessidade de um novo olhar diante da questão ambiental no tratamento de resíduos.

## **1.1 Objetivos**

### **1.1.1 Objetivo Geral**

Avaliar o desempenho técnico no processo de produção de energia térmica e elétrica por meio do biogás, com diferentes teores de metano.

### **1.1.2 Objetivos Específicos**

- ⇒ Purificar o biogás em três características distintas com presença de CH<sub>4</sub> para fins de utilização;
- ⇒ Avaliar a geração de energia elétrica para cada característica de utilização;
- ⇒ Avaliar a geração de energia térmica para cada característica de utilização;
- ⇒ Fazer uma relação de energia consumida com os valores de energia elétrica e térmica gerada, avaliando individualmente a eficiência energética obtida.

## **2 REFERENCIAL TEÓRICO**

Para melhor compreensão deste trabalho, a fundamentação teórica será estruturada em quatro tópicos. O primeiro aborda a energia como produto fundamental na sobrevivência e existência dos seres vivos, além de trazer a matriz energética na sociedade. Na sequência, são apresentadas as políticas sobre energias alternativas renováveis. No terceiro tópico, são apresentados o biogás e os processos de purificação do biogás para obtenção de biometano. Após, apresenta-se a cogeração de energia e os motores de combustão interna que foram utilizados nesta pesquisa, que contempla e integra o tema dessa pesquisa com o biogás.

### **2.1 A energia como produto fundamental na sobrevivência e existência dos seres vivos e a matriz energética**

O desenvolvimento dos seres humanos está fortemente ligado à utilização de energia. Desde a antiguidade, quando a humanidade já estava preocupada em gerar recursos que minimizassem suas dificuldades e viessem a melhorar seu conforto, ao compreender a artimanha do fogo, aprimorou sua alimentação, iluminação e segurança. Apoiou-se no potencial das águas e do vento. Até que um acontecimento histórico aperfeiçoou o desenvolvimento da energia: a criação da máquina a vapor Moraes (2015).

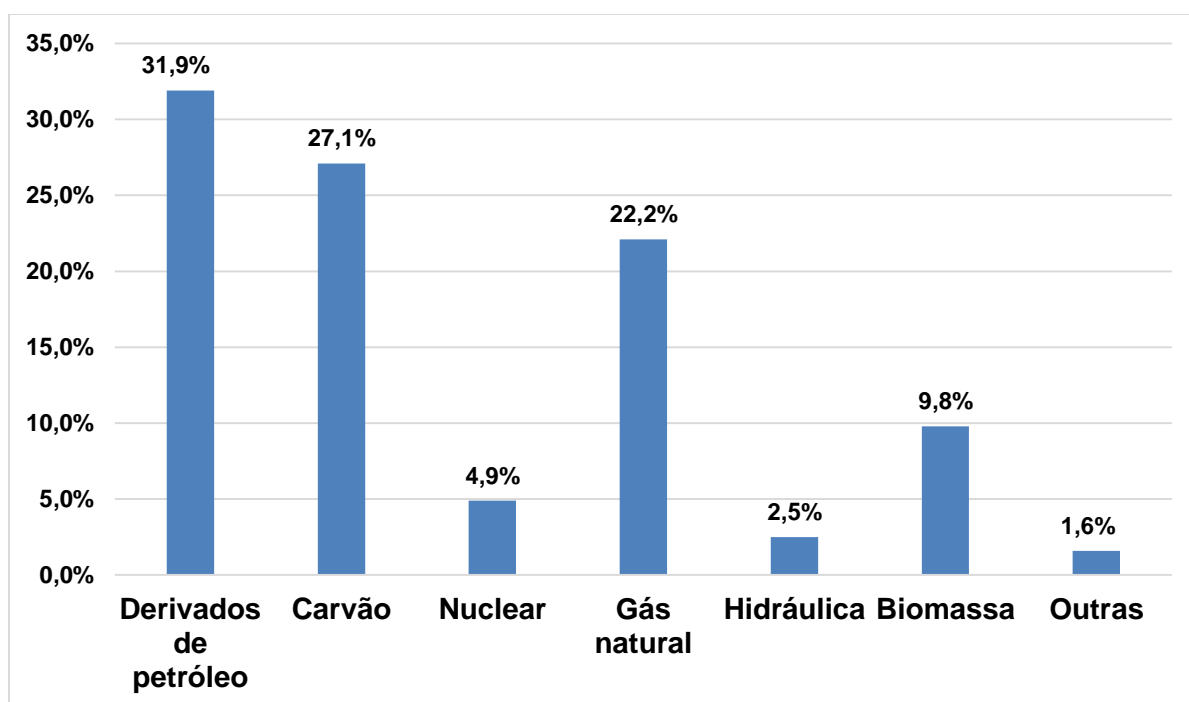
A Revolução Industrial e o aumento populacional ocasionaram um avanço no consumo de energia, estabelecendo drasticamente o uso e importância da energia

para os tempos modernos que se iniciavam. Na metade do século XIX, o aumento no consumo de novas fontes de energia consagradas, como petróleo e eletricidade, foi responsável pelo salto no desenvolvimento da humanidade, chegando até os dias de hoje e disponibilizando de todo um conforto Moraes (2015). Tolmasquim, Guerreiro e Gorini (2007, p. 47) destacam:

Desde a Revolução Industrial, a competitividade econômica dos países e a qualidade de vida de seus cidadãos são intensamente influenciadas pela energia. Em um mercado global e em face das crescentes preocupações com o meio ambiente, essa influência se mostra cada vez mais decisiva. Nesse contexto, as economias que melhor se posicionam quanto ao acesso a recursos energéticos de baixo custo e de baixo impacto ambiental obtêm importantes vantagens comparativas. Nas próximas décadas, essa questão se apresenta para o Brasil a um só tempo como um desafio e uma oportunidade. Desafio, porque o desenvolvimento econômico e social demandará uma expressiva quantidade de energia e com isso um alto grau de segurança e de sustentabilidade energéticas. Oportunidade, porque o Brasil dispõe de condições especialíssimas de recursos energéticos renováveis e de tecnologia para transformar suas riquezas naturais em energia e dessa forma agregar valor à sua produção de riqueza.

Já no século XX, o saldo abundante de energia, conseguido basicamente a partir do petróleo e carvão mineral, deu amparo a significativas alterações do setor econômico global. Por meio da Figura 1 (apresentada na sequência), é possível perceber que entre as fontes da matriz energética mundial, ainda em 2017, as que predominam como maior utilização são as oriundas de combustíveis fósseis.

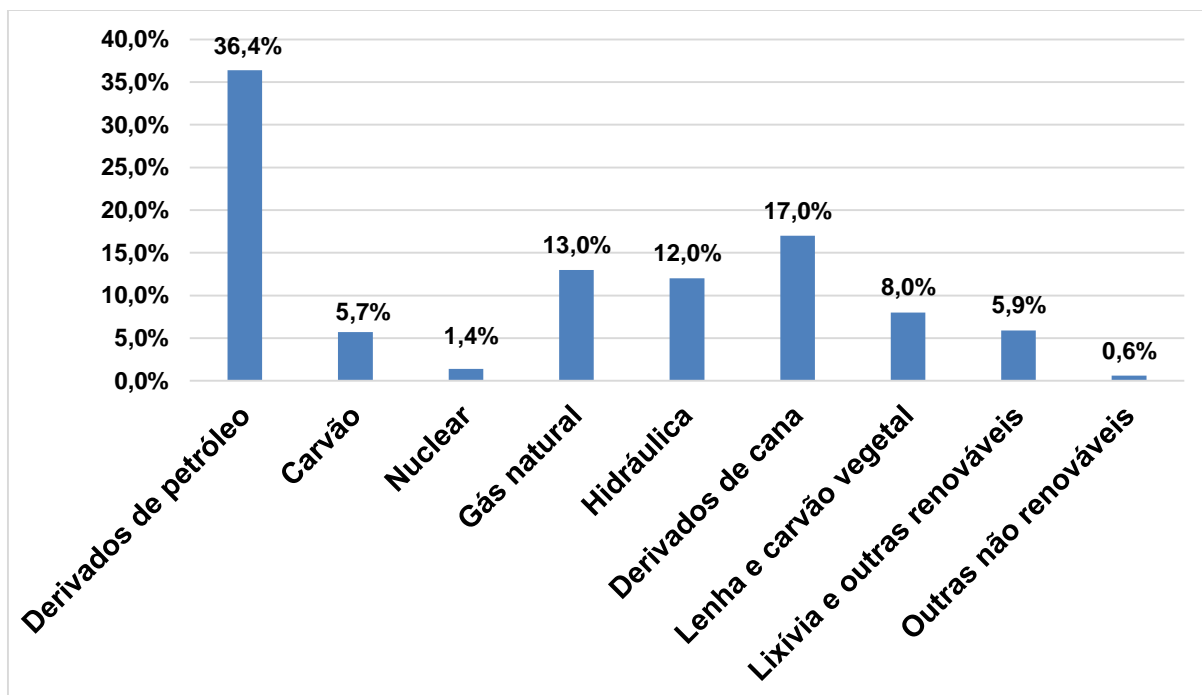
Figura 1 – Composição da matriz energética mundial 2017



Fonte: Brasil (2018).

Em âmbito nacional, a matriz energética do Brasil tem certa diferença em relação ao nível mundial, mas, ainda assim, o consumo maior é das fontes não renováveis. São apresentadas na Figura 2 as fontes que formam a matriz energética brasileira: é possível observar uma maior utilização do petróleo e seus derivados, principalmente pelo setor rodoviário e das indústrias, que utilizam grande volume de seus insumos procedentes dessas fontes.

Figura 2 – Participação de cada fonte na matriz energética brasileira 2017



Fonte: Brasil (2018).

Logo no início deste século, a situação encaminhou-se ao encontro de uma nova exigência: a do desenvolvimento sustentável. Nos anos 90, especialistas já alertavam para os impactos que ocorreriam devido à degradação ambiental produzida pelo homem, estando o aquecimento global entre as maiores preocupações, em virtude das emissões dos Gases de Efeito Estufa (GEE), dispostos em grandes proporções na queima das fontes fósseis para produção de alguns derivados, entre eles a energia elétrica. Outro elemento a se considerar é o esgotamento das reservas de recursos naturais como carvão mineral e petróleo (ANEEL, 2008).

Diante desse cenário, a busca por soluções e sistemas mais eficientes, como a utilização de energias renováveis (solar, eólica, biomassa etc.), vem ganhando destaque. No entanto, uma mudança de hábito dos usuários é fundamental para a quebra de paradigma nessa transição consistente, através de uma abordagem multidisciplinar de esforços educacionais de curto e longo prazo (PUCRS, 2010).

Especialistas alegam que essa transição resultará em uma exigência na destinação de recursos para educação, no sentido de estimular a busca por entendimento em relação aos motivos das instabilidades do setor energético, a

concepção de ligação entre energia e meio ambiente, a conveniência de alavancar o desenvolvimento de modo sustentável, a utilização popular da energia e a submissão essencial da humanidade em relação à natureza (PUCRS, 2010).

Além da energia, alguns outros fatores que apontam uma nação em desenvolvimento são: organização das bases de uma sociedade, abastecimento de água potável, esgoto sanitário, limpeza e manejo de resíduos sólidos e transportes. Tratando especificamente da energia, é uma variável significativa que está inserida em todos esses panoramas. Exposto como elemento determinante para o desenvolvimento econômico e social dos países, ela representa o produto interno bruto que propicia amparo mecânico, térmico e elétrico dentre as ações humanas (ANEEL, 2008).

Dentro desse contexto global – e de forma predominante –, o sustento energético é oriundo dos recursos não renováveis, ou seja, originários das fontes fósseis. Ventura Filho (2009) destaca que a queima desses combustíveis é um dos potenciais produtores de CO<sub>2</sub>, um dos gases causadores do “efeito estufa”, provocando também alterações climáticas da Terra. Já Souza (2015) salienta que, não bastando só os gases poluidores, ainda é possível mencionar os vazamentos nas plataformas *offshore*, que significam imenso dano ambiental na fauna marinha e para as aves que necessitam desse meio para sua sobrevivência.

Em um período de aproximadamente 27 anos, a matriz energética não apresentou transformações significativas em suas utilizações. Conforme Ventura Filho (2009), com forte origem nas fontes fósseis, o carvão mineral no século XIX, o gás natural e o petróleo no século XX resultam em uma parcela de apenas 14% de fontes energéticas renováveis no fornecimento das demandas mundiais de energias. Simioni (2006, p. 28) corrobora, destacando que:

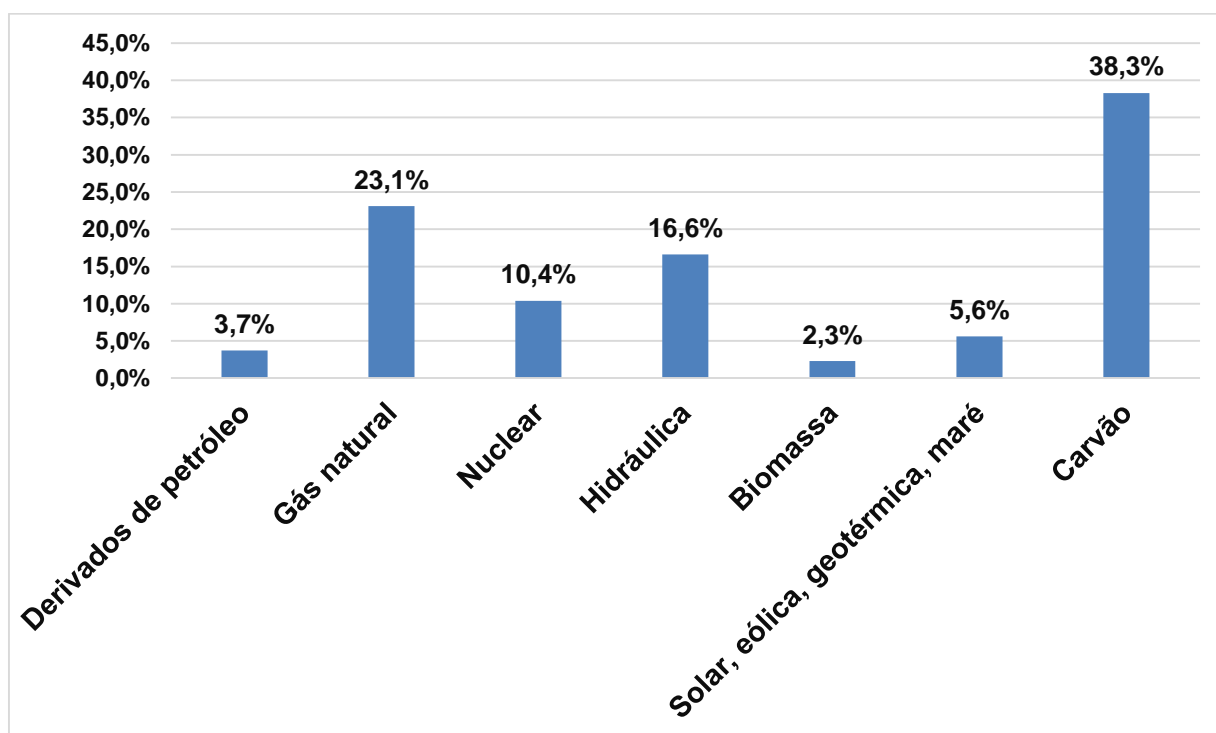
Pensar em novas fontes de energia a partir de referenciais socioambientais significa, principalmente, pensar em evitar riscos de autodestruição e em obter-se vantagens socioambientais, mais do que vantagens econômicas. Significa também transformações na estrutura econômica, de forma semelhante com o que ocorreu em outros momentos da história, como no início da era do petróleo. Nossa conclusão é de que é possível reestruturar o setor de energia a partir de outros elementos, outros referenciais que não a

lógica econômica, porém, isto exigirá posturas mais aguerridas, “subversivas” e corajosas.

Com as taxas de crescimento no consumo desses insumos energéticos, é também apresentada uma preocupação quanto ao tema de segurança desses suprimentos e meio ambiente em âmbito mundial. Essa insegurança é sinônimo de vulnerabilidade desses suprimentos pela resultante combinação de alguns fatores como crescimento acelerado da demanda em desigualdade com produção, instabilidade política em áreas produtoras, nacionalização da produção e esgotamento das reservas (CNI, 2007).

O petróleo tornou-se uma vulnerabilidade de governo na redução da dependência pela substituição por biocombustíveis, o que permite observar um incremento de influência das políticas públicas diante dos problemas ambientais e a transação forçada de inserção de energias alternativas, renováveis e biocombustíveis (CNI, 2007). No entanto, tratando-se especificamente da matriz elétrica mundial, a Figura 3 apresenta as principais fontes que são utilizadas para a produção de energia elétrica (BRASIL, 2018).

Figura 3 – Principais fontes que formam a matriz elétrica mundial 2017



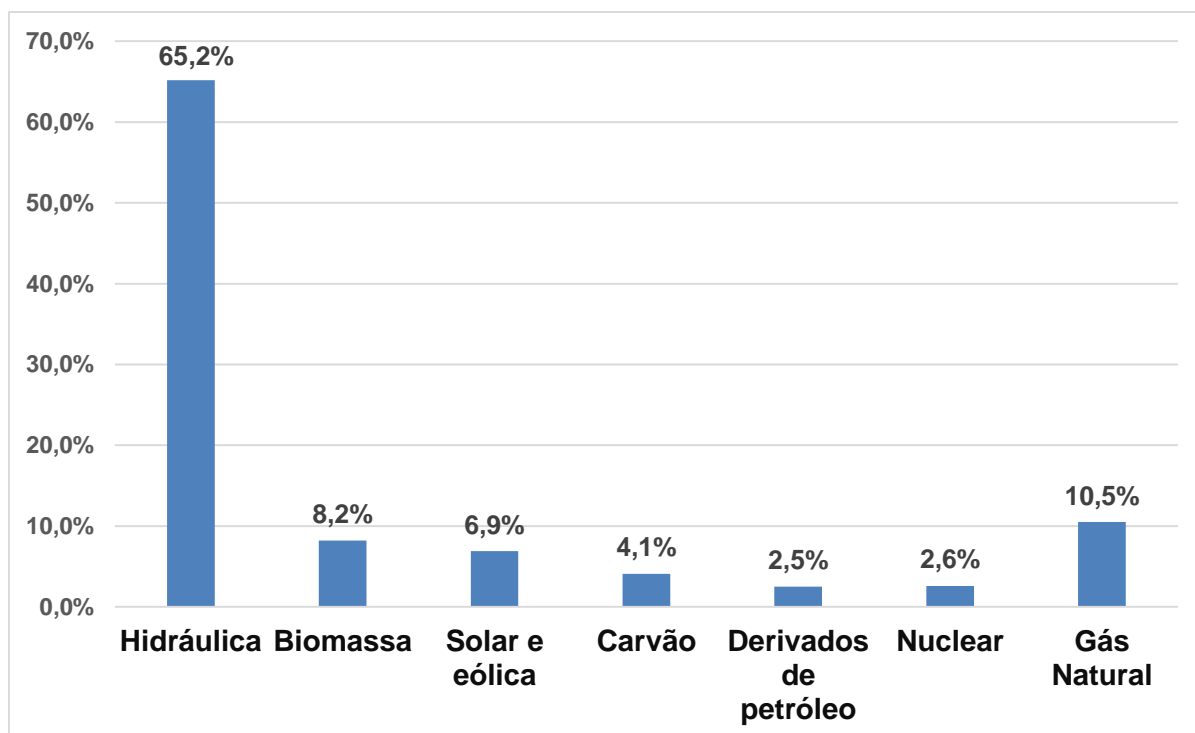
Fonte: Brasil (2018).



Pensando na produção de energia elétrica nacional, Bronzatti (2008) destaca que, apesar da ampla capacidade no aproveitamento de combustíveis fósseis para produção de energia elétrica, a maior parte dessa produção – aproximadamente 63% – é de usinas hidrelétricas, consideradas limpas e renováveis, além de contar ainda com um imenso potencial de outras fontes renováveis como a eólica, solar e biomassa.

A Figura 4 explicita o domínio das fontes hidro na matriz elétrica brasileira, sendo ainda maior do que o autor supracitado destaca, cerca dos 65,2% para a produção de energia elétrica no Brasil, o que o faz ser um país com maior parte da energia renovável.

Figura 4 – Participação de cada fonte na matriz elétrica Brasileira 2017



Fonte: Brasil (2018).

Em seu trabalho, Guerra (2015) destaca que o Brasil, mesmo sendo o maior produtor mundial de energia elétrica renovável, graças ao imenso potencial hidro,

apresentou, em 2011, uma geração de 88% de energia renovável em sua matriz, tendo ainda um abundante potencial de crescimento na utilização de energias renováveis, como a eólica, a solar e a biomassa, na qual tais explorações promovem mitigar cenários de evolução maior ainda no panorama Brasileiro. Entretanto, considerando alguns fatores sociais e ambientais, conforme alerta Moraes (2015), surgem grandes investimentos nas fontes renováveis de energia, crescendo também estudos que objetivam o melhor aproveitamento desses recursos disponíveis.

Com um aumento médio no consumo de energia elétrica no Brasil de 3,5% ao ano – nos últimos dez anos – e uma potência instalada de aproximadamente 260 GW em 2014, com um consumo de 88 GW, não se tem uma situação satisfatória no sistema elétrico brasileiro: a capacidade não corresponde à demanda. Moraes (2015) destaca ainda que, para atender essa necessidade, são utilizadas usinas termelétricas tendo como principal combustível o gás natural importado; caso venha a faltar, deixará de ter geração de energia suficiente para o país.

No decorrer da evolução tecnológica e com o desenvolvimento do estilo de vida da sociedade, ocorreu uma intervenção junto à conduta da matriz energética. Ventura Filho (2009) afirma que, uma vez percebido o esgotamento considerado na perspectiva futura das fontes fósseis de energia, uma estratégia viável é o aproveitamento expressivo das fontes alternativas para o suprimento das demandas energéticas. Corroborando com tal ideia, Tavares (2012) destaca que, junto desse âmbito de preocupação com a segurança da matriz energética e mudanças climáticas, é essencial a introdução cada vez maior de fontes renováveis de energia, pois promovem segurança na matriz energética e enquadram-se com um dos principais dispositivos no combate às mudanças climáticas decorrentes da elevação dos gases de efeito estufa na atmosfera.

As fontes de energias renováveis vão além dos benefícios de redução de efeitos nocivos ao meio ambiente e à saúde. Se implantadas corretamente, têm papel fundamental no desenvolvimento social e econômico das nações (CNI, 2007). Surgindo, então, como alternativas ou como complemento às convencionais, as fontes energéticas renováveis podem ser de diferentes origens. Esta pesquisa, no entanto, dá maior ênfase à energia extraída a partir das biomassas.

Diante do panorama exposto anteriormente, percebe-se a necessidade de remodelar a matriz energética mundial e nacional, aumentando o uso das biomassas e diminuindo a utilização de combustíveis fósseis. Conforme a IEA (2016), apesar do uso dessa fonte ser ainda pequeno – com cerca de apenas 13% do consumo mundial –, a biomassa tem capacidade de avanço elevado em sua utilização em um futuro imediato. Sauer et al (2006, p.20) destacam:

A energia proveniente da biomassa tem ainda a grande vantagem de gerar energia elétrica próxima ao local de consumo, reduzindo os gastos com transmissão. O processo mais usual de geração de energia elétrica a partir de biomassa no Brasil é a combustão direta, gerando vapor para acionar uma turbina acoplada a um gerador elétrico.

Galaverna e Pastre (2017) destacam que a energia das biomassas, além de estar se tornando um elemento de prestígio econômico e industrial, já é considerada uma segurança na matriz energética mundial. Já na matriz nacional, sua presença é de 31%. Apesar disso, no mês de novembro de 2013, o Brasil complementou a produção com 11.250 MW de potência oriunda das biomassas, ultrapassando a Usina Belo Monte, com capacidade considerada de 11.233 MW.

Nota-se que o Brasil possui uma geração de biomassa com capacidade de exploração energética, estando relacionado com o setor agroindustrial, setor silvicultural e na produtividade agrícola. É sabido que tais setores precisam de alta demanda de energia elétrica e até vapor em seus processos produtivos, e, conforme salienta Santos (2017), se introduzissem a estratégia da cogeração, empregando seus próprios resíduos gerados, haveria possibilidade de minimizar essa necessidade.

Konrad et al. (2016) enfatizam que podem ser consideradas como biomassa materiais de procedência agrícola, florestal e os rejeitos industriais e urbanos. Portanto, na geração de energia proveniente da biomassa deve ser fundamental sua sustentabilidade pelo ponto de vista social, ambiental e econômico. Santos (2017) salienta as vantagens ambientais em todas as fases da geração da biomassa/eletricidade, visto que o tópico ambiental é crucial para aplicação dessa ferramenta. Konrad et al. (2016) também destacam a existência das mais variadas

possibilidades tecnológicas na transformação de energia contida nas biomassas, podendo ser uma única tecnologia, para liberação em forma de calor, ou até mesmo várias tecnologias para obtenção de energia e também como biocombustível veicular.

Silva (2017), em seu trabalho “Avaliação da contribuição ambiental e socioeconômica de uma unidade rural de produção de biogás no município de Monteiro – PB”, aponta que dentre as várias tecnologias existentes, a biodigestão de resíduos agrícolas vem sendo uma aplicação com vantagens importantes para propriedades rurais. Além de inserir uma contribuição ambiental, com o tratamento de resíduos, os biodigestores fornecem o biogás, que pode ser usado como fonte de combustível, e o biofertilizante, que é um adubo orgânico rico em nutrientes de reposição para o solo. Nesse contexto, o estudo teve por finalidade avaliar as principais contribuições ambientais e socioeconômicas de um sistema de produção de biogás em uma unidade rural localizada no município de Monteiro-PB.

## **2.2 Políticas sobre energias renováveis**

Depois de dois séculos de obtenção abundante de energia, sem ponderar os impactos ambientais que chegaram agregados à industrialização e ao consumismo, causando a redução dos recursos naturais, o século XX apresentou uma transição de práticas nas políticas públicas quanto ao cuidado com meio ambiente, procurando um desenvolvimento sustentável (MENKES, 2004).

Nessa perspectiva, Rodrigues (2009) relata que um fato marcante instigou os novos desenvolvimentos tecnológicos e políticas públicas na busca pela utilização de fontes renováveis: a crise do petróleo, nos anos 70, e em consequência, o Proálcool, em 1975, que proporcionou alterações consideráveis na matriz energética brasileira. Cavicchi (2016) apresenta, em suas análises, que o desenvolvimento de energias renováveis em Emilia Romagna, na Itália, também aconteceu a partir da crise do petróleo em 1970. Porém, por lá, a tentativa tornou-se um problema e jogo político quando entrou em ação a realização dos objetivos da União Europeia para 2020 em diminuir as emissões de GEE. Apareceram, assim, resultados insustentáveis por

casos relacionados com aumento no preço do aluguel de terras e aumento do valor das culturas energéticas, causando necessidade de importar biomassa, entre outros. Na Argentina, segundo retrata Recalde (2015), o impulso das energias renováveis vem enfrentando barreiras desde os anos noventa, devido aos baixos preços que foram consolidados pela geração térmica proveniente do gás natural e por acordo de congelamento dos preços de energia e de subsídios. Dessa forma, o país sofre com reduções dos investimentos externos, que constituem a oferta dos financiamentos para esses tipos de projetos.

Já na matriz energética brasileira, em 2012, conforme dados da ABRAF (2013), para estimular e fomentar a participação de fontes renováveis, foi aprovada a Lei 3.529/12, com um projeto de incentivo ao uso de biomassa como fonte de energia, podendo ser de várias matérias orgânicas, entre elas lixo urbano, bagaço da cana, resíduos agroflorestais e agropecuários.

Criado pela Lei nº 10.438/2002, o “Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica – PROINFA” surgiu como uma maneira de estimular a participação de fontes renováveis para o crescimento na geração de energia elétrica no Sistema Interligado Nacional (SIN), sendo uma nova fase na expansão das fontes de energias (KARLSSON et al., 2014). Por sua vez, Recalde (2015) retrata essa confirmação destacando que, em um período de décadas, não houve mudanças na matriz energética, principalmente para as fontes renováveis, mesmo estando em transição de modificação dos combustíveis energéticos, o que pode ser retratado de alteração é em relação à quantidade de energia ofertada.

No Rio Grande do Sul, a Lei nº 14.864/2016 estabeleceu, no Rio Grande do Sul, a Política Estadual do Biometano, que, conforme Konrad et al. (2016), proporcionou um incentivo apropriado para a cadeia produtiva na geração e utilização do biometano no estado. Também o decreto 48.530/2011 busca encontrar aliados em trabalhos e instituições para realizar práticas na geração de energia vinda das biomassas residuais, principalmente do biogás. Segundo (OBSERVATÓRIOS SISTEMA FIEP, 2016), em um período de 40 anos (1970 a 2010), as tecnologias de produção e utilização do biogás ainda estiveram em estado embrionário, apresentando aumento na utilização a partir de 2010 na geração de energia elétrica, deixando de ser um passivo ambiental e passando a ser um ativo energético.

A Resolução Normativa nº482, de 17 de abril de 2012 (ANEEL, 2012), consolidou a microgeração e minigeração distribuída de energia elétrica. Vale ressaltar que o método de microgeração distribuída consiste no local onde será gerada essa energia, sendo essa potência menor ou igual a 75 kW. Já na minigeração distribuída o que muda é o valor da potência instalada, que vai de 75 kW a 5 MW provenientes de fontes alternativas renováveis. Direitos como compensação, melhoria, reforço e outros foram alterados nos Módulos Um e Três dos Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST, em 24 de novembro de 2015, pela Resolução Normativa nº 687 (ANEEL, 2015).

Com alterações de outras publicações anteriores, a resolução nº 8, de 30 de janeiro de 2015, divulgada pela diretoria da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis – ANP, contém aprovação para utilização do biometano proveniente de resíduos orgânicos agrossilvopastoris, resíduos sólidos urbanos e esgotamento sanitário para veículos, instalações residenciais e comerciais (ANP, 2015).

Produzido a partir da purificação do biogás, o biometano deve seguir algumas especificações normativas: uma delas é manter a porcentagem de metano de no mínimo 90% para obter o deferimento para utilização e comercialização. Essa resolução recém-citada ainda engloba autorização de liberação das unidades de compressão e instalações diretamente no produtor para inspeções rotineiras (ANP, 2015).

### **2.3 Biogás e Processos de Purificação**

O biogás tem sua formação onde existem materiais orgânicos em estado de degradação. Karlsson et al. (2014) destacam que o biogás origina-se a partir do fracionamento dessa matéria, principalmente em condições anóxicas. O autor também salienta que para ocorrer a produção de biogás é relevante a atividade de algumas comunidades de microrganismos em conjunto com alguns critérios, como pH, temperatura e tipo de substrato.

A degradação de resíduos orgânicos provenientes do lixo doméstico, práticas agrícolas e outros podem ser utilizados em biodigestores. Com esses biodigestores, é possível conseguir a formação de biogás, que pode ser utilizado como combustível, conforme Pecora (2006), por oferecer elevado poder calorífico e ainda ter seu potencial poluidor minimizado, quando colocado em combustão.

O processo de produção de biogás pode ser dividido em quatro fases na digestão anaeróbica: hidrólise, acidogênese, acetogênese e metagênese. A primeira fase é a hidrólise, etapa em que, conforme Karlsson et al. (2014), os materiais orgânicos – como carboidratos, aminoácidos, álcoois e ácidos graxos ditos de cadeia longa – sofrem a quebra dessa cadeia, convertendo-os em cadeias curtas, servindo para alimentação dos microrganismos. A segunda fase, a acidogênese, vem em seguida, conforme afirma Pecora (2006), formando os compostos com possibilidade de solubilidade, especialmente ácidos graxos voláteis. Nessa etapa, são produzidos os ácidos acéticos, butírico e láctico, conforme Karlsson et al. (2014), dependendo dos microrganismos presentes e das condições do ecossistema.

Na terceira fase, a acetogênica, além de antecipar o gás metano, as partículas que haviam sido quebradas na primeira fase são novamente fracionadas e produzem ácido acético, hidrogênio e o dióxido de carbono. Porém, Karlsson et al. (2014) salientam que uma parcela desse hidrogênio é absorvida pelos microrganismos metanogênicos.

A última fase é a mais importante na produção do biogás: é nela que acontece a formação do metano ( $\text{CH}_4$ ) e também o gás carbônico ( $\text{CO}_2$ ). No entanto, Pecora (2006) frisa que se deve ter atenção especial quanto ao pH – que deve ter um equilíbrio basicamente neutro entre 6,8 e 7,3 – e também quantos às substâncias tóxicas. Além disso, essas bactérias são mais sensíveis a intervenções do que as existentes nas etapas anteriores, conforme pesquisas de Karlsson et al. (2014), sendo elas pertencentes a outro grupo de microrganismos, devendo, assim, harmonizar o processo para que elas atuem de modo mais apropriado possível, tendo em vista que é este o gás que acarreta a receita.

O biogás é composto por aproximadamente 60% de metano, 35% de dióxido de carbono e em torno de 5% de outros gases como, hidrogênio, ácido sulfídrico,

monóxido de carbono, amônia, oxigênio. Coldebella (2006) afirma que há possibilidade de o biogás chegar a 80% de metano na fermentação, dependendo de temperatura e pressão. O autor destaca também que na aplicação do biogás como suprimento energético o essencial é o metano ( $\text{CH}_4$ ). Sendo ele apresentado purificado dentro da pressão de 1atm e com uma temperatura de  $0^\circ\text{C}$ , seu poder calorífico inferior (PCI) é de  $9,9 \text{ kWh/m}^3$ . Em contrapartida, esse mesmo gás, com seu teor de metano entre 50 e 80%, apresentará um poder calorífico inferior variando entre  $4,59$  e  $7,92 \text{ kWh/m}^3$ .

A qualidade do biogás, para fins de aproveitamento energético, depende da concentração de metano. A presença de água, dióxido de carbono e outros gases diferentes do metano, no biogás, prejudica o processo de queima, tornando-o menos eficiente. O gás sulfídrico ( $\text{H}_2\text{S}$ ), formado espontaneamente durante a digestão anaeróbia a partir de compostos de enxofre presentes no substrato, conforme FEAM (2015), é o principal composto indesejável, necessitando remoção em praticamente todos os usos energéticos.

Kemp e Foxon (2007) propõem que as inovações relacionem-se à redução de impactos ambientais, mas que também se direcionem à produção, aplicação ou exploração de um bem, serviço, processo produtivo, e que resultem na redução de riscos ambientais, poluição e impactos negativos do uso de recursos como a energia. É importante destacar que o biogás também é um combustível adequado para a geração de energia elétrica ou cogeração, e diversas tecnologias estão disponíveis, conforme Lantz (2004), sendo as principais aplicações em geradores com combustão interna e as turbinas a gás.

Os motogeradores a gás possuem requisitos de qualidade do gás similares às caldeiras, com exceção de que a concentração de  $\text{H}_2\text{S}$  deve ser menor para garantir um tempo de operação razoável para o sistema. Sistemas Otto projetados para funcionar com gasolina são bem mais suscetíveis a  $\text{H}_2\text{S}$  do que o sistema a diesel, mais robusto. Lantz (2004) destaca que para aplicações em maior escala ( $>60 \text{ kW}$ ), portanto, predominam os sistemas a diesel.

O impacto do gás sulfídrico em sistemas de aproveitamento energético refere-se à formação de óxidos de enxofre, durante o processo de combustão, altamente



solúveis em água e precursores da formação de ácido sulfúrico, que reduz a vida útil das tubulações e equipamentos. O processo de remoção do  $\text{H}_2\text{S}$  na forma gasosa é denominado “dessulfurização” e pode ocorrer utilizando-se de processos físicos, químicos ou biológicos. Destaque para os processos físicos, que se caracterizam por sua simplicidade, conforme FEAM (2015), adequados para soluções de pequena escala, sendo utilizadas substâncias como óxido de ferro III ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), hidróxido de ferro III ( $\text{Fe}(\text{OH})_3$ ) ou carvão ativado nos sistemas de filtragem.

Pesquisas como as de Salazar (2014), Silva (2017) e Suzuki et al. (2011) indicam que o processo de purificação do biogás objetiva o aumento do poder calorífico do gás e de sua qualidade, por meio da remoção de componentes não combustíveis, o que resulta em um combustível gasoso com elevado teor de metano e características equivalentes às do gás natural.

A purificação (*upgrading*) do biogás envolve a sua transferência para um sistema de purificação, conforme Monteiro (2011), cuja ação resulta no isolamento do metano dos demais constituintes, a partir da remoção do dióxido de carbono, aumentando o poder calorífico desse biocombustível. Miyawaki (2014) e Silva (2017) apontam que, dentre os processos utilizados para a purificação do biogás, podem ser destacados purificação por membranas, purificação criogênica, lavagem por água, purificação biológica e por adsorção com modulação de pressão. Esta última é a que será utilizada no trabalho em questão.

Na sequência, são apresentados alguns desses processos de purificação possíveis para o biogás.

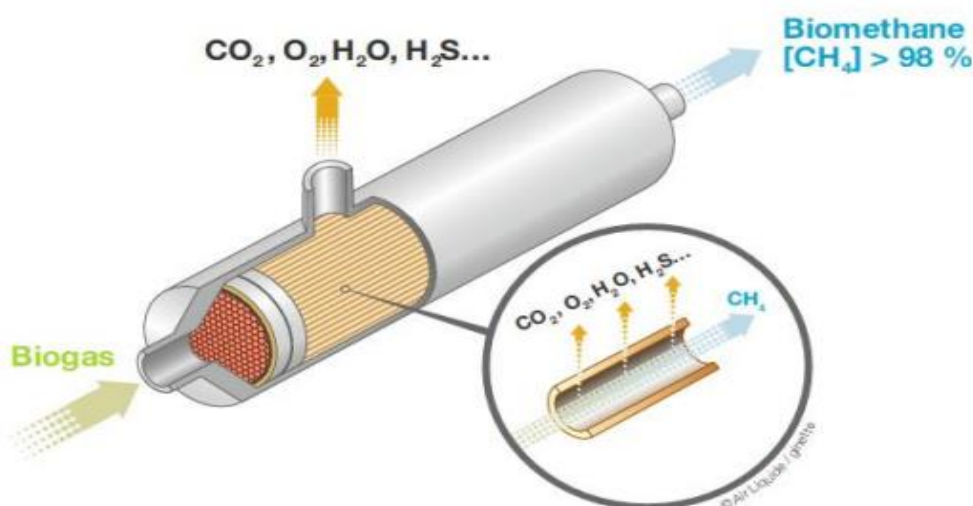
### **2.3.1 Processo de purificação por membranas**

Considerado ainda um processo novo na questão de purificação de biogás, o sistema de purificação por membranas, conforme cita Canever (2017), consiste na eficiência de seleção que alguns materiais têm para deixar transpassar entre suas frações certos componentes dos gases, retendo outros. Segundo Zhao (2010), existem duas técnicas de separação por membrana: separação de gases a alta

pressão e adsorção gás – líquido. O processo de alta pressão separa seletivamente  $\text{H}_2\text{S}$  e  $\text{CO}_2$  do  $\text{CH}_4$ . Geralmente esse processo é feito em três estágios e chega-se a uma pureza de 96% de  $\text{CH}_4$ . A adsorção gás – líquido é um processo recente que usa membranas micro porosas hidrofóbicas como uma interface entre gás e líquidos.  $\text{CO}_2$  e  $\text{H}_2\text{S}$  dissolvem na parte líquida enquanto o  $\text{CH}_4$  é removido.

Niesner et al. (2013) salientam que existe uma combinação de gases no biogás que, ao passar por um separador de membranas, é separado em duas partes: uma em que fica uma porção represada, composta principalmente por metano, e outra que consegue atravessar a membrana, normalmente de dióxido de carbono e outros gases, como exibido na Figura 5.

Figura 5 – Purificação de biogás por membrana



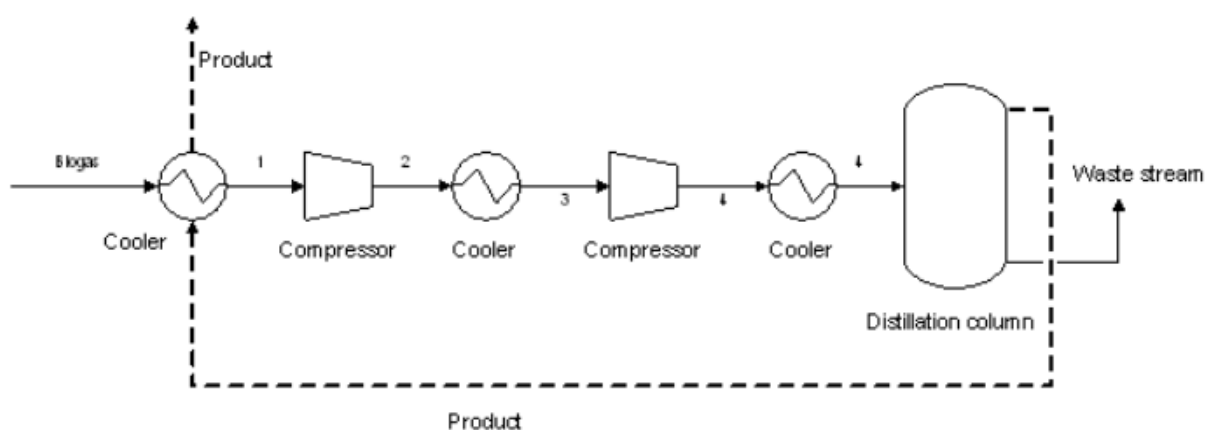
Fonte: Bauer et al. (2013).

Nozic (2011) destaca que o funcionamento ocorre pelas diferentes velocidades e tamanhos que as moléculas apresentam. Desse modo, a molécula de metano dissipa-se mais rapidamente pelo seu tamanho reduzido. Já o dióxido de carbono e o sulfeto de hidrogênio têm uma menor difusão, podendo ser ajustada a pureza do gás pelo tipo de membrana, velocidade do fluxo e número de estágios percorridos no processo de separação.

### 2.3.2 Processo de purificação criogênica

O processo de purificação pelo método da separação criogênica é destacado por Zhao (2010) como separação dos gases como sulfeto de hidrogênio e dióxido de carbono em temperaturas muito baixas, em torno de  $-100^{\circ}\text{C}$ , com pressão de trabalho aproximadamente de 40 bar. A separação desses gases é possível por liquefazerm-se em diferentes temperaturas e pressões. A Figura 6 mostra um sistema de purificação criogênica.

Figura 6 – Processo de purificação do biogás com separação criogênica



Fonte: Zhao (2010).

Além disso, é exposto por Zhao (2010) o emprego de compressores e trocadores de calor em série, em que o biogás passa pelo primeiro trocador, sendo resfriado até  $70^{\circ}\text{C}$ . Após, segue para outros compressores e trocadores de calor que vão refrigerando e comprimindo até entrar em uma torre fracionaria, na qual ocorre a separação por destilação do  $\text{CH}_4$  dos outros gases, sobre tudo do  $\text{H}_2\text{S}$  e  $\text{CO}_2$ .

### 2.3.3 Processo de purificação com água pressurizada

Para remoção de  $\text{CO}_2$  e  $\text{H}_2\text{S}$ , é utilizado o sistema de purificação por meio de água pressurizada, que funciona com a injeção do biogás pela parte inferior de uma coluna, e a água contra corrente pressurizada, de cima para baixo. Segundo Zhao (2010), após essa água sair da coluna contendo  $\text{CO}_2$  e também certa quantidade de  $\text{H}_2\text{S}$ , ainda é possível uma nova recirculação na coluna.

Canever (2017) considera que esses dois gases são facilmente removidos pela água por serem mais solúveis que o metano, permitindo que seja extraído do processo um gás rico em  $\text{CH}_4$ . Conforme relatado por Bauer et al. (2013), esse sistema produz purificações na faixa de 95%, existindo, no entanto, viabilidade de melhorar com utilização de bombas e compressores.

### 2.3.4 Processo de purificação biológica

É um trabalho de filtragem realizado por microrganismos que degradam o  $\text{H}_2\text{S}$ , com possibilidade de integrar o processo. Conforme Zhao (2010), também utiliza-se uma coluna de lavagem de gás, que necessita de um meio alcalino com pH entre 8 e 8,5, pois, desse modo, as bactérias fazem oxidação do sulfeto de hidrogênio com oxigênio existente no reator.

Al Seadi et al. (2008) também salientam que essa oxidação biológica tem possibilidade de ser realizada no interior do biodigestor ou no exterior: é necessário que seja injetada no interior do biodigestor uma quantidade de ar entre 2% e 8%, estando ainda o biogás bruto. Nesse local, juntamente com presença de bactérias oxidativas de sulfeto (*Sulfobacter* – presentes no interior do biodigestor), transformam os sulfeto de hidrogênio em enxofre elementar. Porém, é importante destacar que no lado de fora ocorre em uma coluna, como citado anteriormente.

As vantagens de procedimentos com utilização de bactérias, segundo Zhao

(2010), são de produção de enxofre elementar como um subproduto que tem possibilidade de ser reutilizado e pouco consumo de energia. Esse autor cita ainda que o sucesso da remoção do sulfeto de hidrogênio decorre exclusivamente do desempenho microbiano.

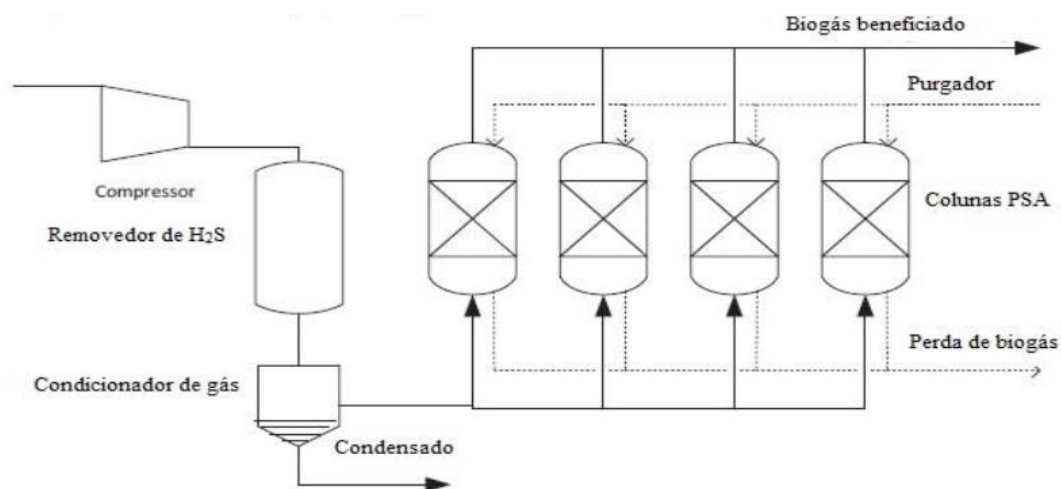
### **2.3.5 Processo de adsorção com modulação de pressão**

Esse é o processo de purificação de biogás utilizado na planta em que este estudo se desenvolveu. O método com modulação de pressão PSA (*Pressure Swing Adsorption*) é caracterizado por ser uma tecnologia versátil e disseminada na área da purificação e separação de misturas gasosas. De acordo com Monteiro (2011), as vantagens da técnica de PSA referem-se à minimização dos consumos energéticos e segurança de operação.

Segundo Rouquerol et al. (2013), a adsorção é caracterizada por um processo químico de interação superficial entre moléculas e um sólido, ou seja, é um fenômeno de adsorver moléculas de uma fase gasosa ou líquida em uma superfície sólida. O princípio de funcionamento de uma PSA dá-se pela injeção do biogás pressurizado em colunas cheias de partículas de adsorvente sólido poroso, podendo ser composto por sílica, zeólita, carvão ativado ou outro. Essa operação repete-se num intervalo de tempo pré-definido, uma vez que uma unidade de PSA funciona em regime cíclico.

De acordo com Monteiro (2011), o regime contínuo é conseguido recorrendo a múltiplos leitos de adsorção. A Figura 7 apresenta o fluxograma do sistema de purificação por adsorção com modulação de pressão (PSA).

Figura 7 – Purificação de biogás por adsorção com modulação de pressão



Fonte: Bauer et al. (2013).

Em seu trabalho, Kim (2015) apresenta que na medida em que a pressão na adsorção e a proporção de gás de purga aumentam nesse processo, aumenta também a purificação, porém diminui a recuperação dos gases. No entanto, enquanto diminui-se a pressão de adsorção, aumenta-se a pureza, mas diminui a recuperação dos gases. Essa diminuição na recuperação, pelos dois métodos, acontece por conta do aumento de gás do produto pelo sistema. Por meio desse modelo de purificação, Zhao (2010) relatam que é possível a purificação chegar em uma porcentagem de metano de 97%, ou ainda melhores resultados se pressurizado entre 7 e 8 bar de pressão e temperaturas entre 50 °C e 70 °C, sendo despressurizada para a liberação do dióxido de carbono em uma das colunas quando saturada a etapa de purificação. Porém, uma desvantagem desse sistema é uma perda de metano entre 1% e 5%, que deve ser queimada na exaustão.

## 2.4 Energia elétrica a partir do biogás e cogeração de energia

A utilização do biogás no emprego de geração de energia elétrica está sendo cada vez mais discutida, criando possibilidades por meio da maximização do tratamento de resíduos, que é um problema em várias áreas de atividades comerciais, incluindo os resíduos sólidos urbanos. Furtado e Serra (2009) acreditam que vem se

tornando um nicho de mercado pelo seu devido tratamento e produção de energia elétrica, proveniente do biogás gerado.

Bonatto (2013), destaca em seu trabalho que o uso de biogás para geração de energia é uma alternativa que diminui as quantidades de gás metano a serem lançadas na atmosfera, além de fornecer uma fonte descentralizada de eletricidade. O trabalho testou a eficiência de remoção de  $H_2S$  com o uso de carvão ativado granular, estudando e comparando a atividade de duas marcas comerciais, CAG Norit e CAG Pelegrini, considerando suas respectivas caracterizações.

Machado (2014), buscou analisar o funcionamento de um gerador equipado com um motor de combustão ciclo Otto, operando com biogás, e o aproveitamento dos gases de combustão em um sistema de cogeração para aquecimento de água. Realizou um comparativo desse sistema com um motor do mesmo fabricante, mas utilizando gasolina como combustível. Os resultados mostraram que é possível obter energia elétrica por meio de um biocombustível e utilizar os gases do escapamento para aquecimento de água, embora o sistema tenha apresentado baixa eficiência. Essa baixa eficiência foi compensada pelo alto potencial de energia térmica disponível no sistema operante com biogás, quando comparado com o sistema com gasolina.

O trabalho apresentado por Silvestre (2015), destacou que o metano apresenta elevado poder calorífico, podendo ser aproveitado energeticamente, sendo importante estudar as emissões desse gás para verificar a viabilidade econômica de seu aproveitamento. No trabalho, foi realizado um levantamento do potencial energético de biogás no aterro sanitário de Brusque, para a geração de energia.

Ainda que pesquisas já tenham mostrado benefícios tecnicamente válidos para produção de biogás e sua geração de energia, Freitas et al. (2019) salientam sobre alguns fragmentos que ainda precisam ser superados, como a falta de políticas e regulamentações mais brandas, que subsidiem esses projetos para viabilizá-los economicamente. É importante que o governo incentive políticas no desenvolvimento de tecnologias para redução de custos na produção do biogás e geração de energia renovável. Fazem-se, também, necessárias parcerias nacionais e internacionais de pesquisa e fornecimento de equipamentos e é de fundamental importância a qualificação de recursos humanos para prestar assistência técnica aos produtores.

Para essa finalidade de geração de energia elétrica com biogás, tem-se a necessidade de algumas tecnologias. Pecora (2006) salienta que essas tecnologias envolvidas consolidam-se por meio de grupos de moto gerador interligados à máquina térmica de combustão interna alternativa (Ciclo Otto), sendo essa adequada para biogás, turbinas a vapor (Ciclo Rankine), turbinas a gás (Ciclo Brayton), entre outras. Henriques (2004) ressalta que, no emprego do biogás para produção de energia elétrica, está se inserindo uma vantagem de geração limpa que vem tendo um crescimento global. Porém, essa transformação de energia química em uma energia elétrica de forma isolada (sem cogeração) demonstra uma eficiência de 20 a 30%, além de prejudicar a questão de viabilidade econômica em muitos casos.

A viabilidade de produção do biogás está intrinsicamente ligada ao seu potencial em produzir energia. De acordo com o ICLEI (2010), a conversão do biogás em energia elétrica ocorre por meio da transformação da energia química contida em suas moléculas em energia mecânica, por um processo de combustão controlada.

Tradicionalmente, a produção de eletricidade e de calor ocorre separadamente. Considerando a tecnologia existente, as máquinas térmicas usadas para a produção de energia mecânica, independentemente do ciclo termodinâmico com que operam, possuem rendimentos relativamente baixos, inferiores a 40% (CHP BRASIL, 2017). Desse modo, aproximadamente 60% da energia contida no combustível é perdida sob forma de calor, o que representa um alto desperdício energético. O calor produzido pelo gerador, seja pela exaustão dos gases de escape, seja pelo líquido de arrefecimento do radiador, pode ser aproveitado para produção de água quente. Nesse sentido, a cogeração de energia possibilita o aproveitamento da energia térmica desperdiçada pelo gerador, ampliando a eficiência energética do sistema (CHP BRASIL, 2017).

Pensando no aproveitamento dessa energia desperdiçada, Bertinotti (2016), Delgado (2016) e FEAM (2015) destacam a sua utilização em situações nas quais existe a necessidade de aquecimento, o que fez surgir o termo cogeração, definida como a produção combinada de energia elétrica e de energia térmica, a partir de uma única fonte de combustível. Na cogeração de energia, são utilizados grupos geradores compostos por um motor à combustão acoplado a um gerador elétrico, também conhecido como *Combined Heat and Power* (CHP). Conforme dados da FEAM (2015),



as principais tecnologias de cogeração são motores de combustão interna (ciclo Otto), bicomcombustíveis (ciclo diesel operando com biogás) e as microturbinas.

A cogeração permite a utilização de vários combustíveis, dos quais se destacam o gás natural, gás propano, fuelóleo e a biomassa, entre outros. O calor produzido pode ser manuseado de diversas formas, incluindo água quente, vapor e ar quente, podendo este último ser utilizado em processos industriais, no campo da climatização de espaços, sistemas AVAC (Aquecimento Ventilação e Ar Condicionado) ou ainda no Aquecimento de Águas Sanitárias (AQS). Delgado (2016) afirma que a cogeração permite melhorar as condições de operacionalidade em relação à sustentabilidade energética, sendo igualmente uma solução vantajosa do ponto de vista econômico.

Na Europa, onde o biogás foi impulsionado por motivos de segurança energética e mudanças climáticas, o principal uso final do biogás, conforme destaca Veiga (2016), é a produção de eletricidade em sistemas de cogeração ou não-cogeração.

Na sequência, são apresentadas algumas das tecnologias para a transformação do biogás.

#### **2.4.1 Motores de combustão interna**

Dentre as tecnologias aplicadas para a transformação energética do biogás, destacam-se as turbinas a gás e os motores de combustão interna (ciclos Otto e Diesel). Monteiro (2011) e FEAM (2015) salientam que, ao se tratar de geração de energia em capacidades pequenas e médias, os motores de combustão interna apresentam menor custo, melhor eficiência e ampla implementação industrial. Nos testes comparativos realizados por Hotta (2019), com motor de combustão interna alimentado com biogás bruto e gasolina, os resultados foram melhores para o biogás quanto à menor emissão de óxidos de nitrogênio (NO<sub>x</sub>) e também para as emissões de monóxido de carbono (CO). Para os testes de emissões de dióxido de carbono

(CO<sub>2</sub>) e para hidrocarbonetos não queimados (UHC), demonstrou-se um pouco inferior ao teste com gasolina.

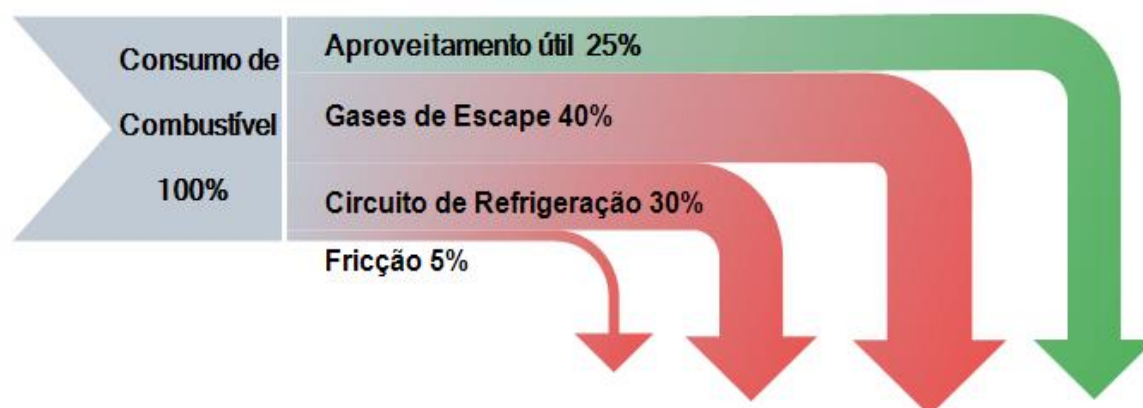
Nos testes realizados por Guerini Filho (2017) em um ônibus movido a biometano – para verificação das emissões em comparação ao Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA) nº 418/2009 –, os resultados para emissão de poluentes e ruídos atmosféricos pelo motor estiveram significativamente abaixo dos níveis permitidos na legislação, demonstrando evidências na possibilidade de substituição total ou parcial dos combustíveis fósseis pelo biometano.

Os motores de combustão interna apresentam-se como máquinas térmicas, nas quais a energia química do combustível transforma-se em trabalho mecânico, sendo que o fluido de trabalho consiste dos produtos da combustão da mistura ar-combustível, e a câmara de combustão e o próprio processo de combustão estão integrados ao funcionamento geral de motor. Os motores de combustão interna representam a tecnologia mais difundida dentre as máquinas térmicas, devido à sua simplicidade, robustez e alta relação potência/peso (ICLEI, 2010).

Werncke (2014), no trabalho “Desempenho energético de um motor gerador de 5 kVA operando no modo dual com diesel, biodiesel de crame e biogás”, avaliou o comportamento do motor de combustão interna quanto à influência da substituição gradual até total de diesel comercial por biodiesel a partir de óleo de crame e a influência do uso de biogás, operando o motor em modo Dual. Foram avaliados o poder calorífico do diesel, do biodiesel e do biogás, a potência gerada em função da carga imposta (kW/kW), o consumo específico de combustível líquido (g/kWh), consumo energético (kJ/h), rendimento (%), redução de consumo de diesel-biodiesel (%), emissão de gases – óxidos de nitrogênio (NO<sub>x</sub>) e monóxido de carbono (CO) – e a variação de temperatura dos gases gerados no motor.

Porém, Pinheiro (2015) salienta que essa energia química que ocorre em motores de combustão interna dissipa-se de várias maneiras. Na Figura 8, podem-se observar tais formas. Sendo um excelente motivo de aproveitamento em cogeração de energia elétrica, cerca de 40% é desperdiçado pela forma de calor no sistema de escape, perdendo-se ainda 30% no arrefecimento e aproximadamente 5% em fricção. Uma pequena parcela de 25% representa o trabalho útil.

Figura 8 – Perdas e aproveitamento da energia de motores de combustão interna



Fonte: Adaptado Pinheiro, 2015.

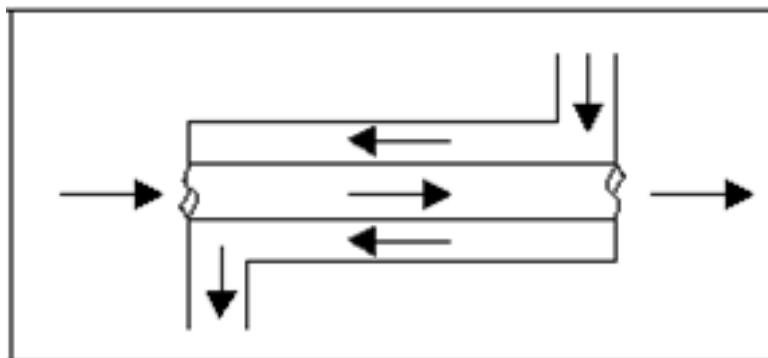
Reis (2016) relata ainda que a proporção de energia desperdiçada na forma de calor dos motores de combustão, quando utilizados na produção de energia, resulta, muitas vezes, em valores mais elevados do que no próprio funcionamento do motor, deixando uma economia energética potencialmente elevada.

#### 2.4.2 Trocadores de calor

Um método de transferência de temperaturas entre dois fluidos, não sendo, necessariamente, no mesmo estado físico; esse processo, em que os fluidos encontram-se separados por uma parede sólida, acontece em várias atividades da engenharia. No entanto, o dispositivo empregado para a realização dessa troca é chamado de trocador de calor, que, de acordo com Incropera et al. (2008), tem sua utilização caracterizada para aquecimentos e condicionamentos de ar, na geração de energia e potência, na regeneração de temperaturas, entre outras. Os trocadores de calor podem ter sua classificação das mais variadas maneiras e configurações, dependendo de fluido, escoamento e modelo de construção.

Na Figura 9, é apresentado um trocador de calor do modelo casco tubo, que tem entradas e saídas opostas dos fluidos. Esse modelo é chamado de contracorrente, conforme Incropera et al. (2008).

Figura 9 – Trocador de calor com fluxo contracorrente.



Fonte: Incropera et al. (2008).

Todavia, Ferreira (2014) salienta que os trocadores de placas, ou do modelo casco tubo, em que houver chicanas em seu interior – causando um turbilhonamento dos fluidos – apresentam uma melhor eficiência dentre os demais. No entanto, outro fator que tem interferência na troca térmica e na eficiência são as vazões dos fluidos, ocorrendo maior ou menor tempo de troca térmica, além do material de construção, sendo esse um dos principais elementos de eficiência dos trocadores. Além de contribuir para a eficiência dos trocadores de calor, Souza (2015) enfatiza que os materiais de fabricação também contribuem para uma maior resistência do equipamento à corrosão/erosão, mantendo-o liberados por períodos mais longos de intervenções de manutenções e limpezas e, conseqüentemente, aumentando sua vida útil.

A importância do emprego de trocadores de calor em aproveitamento e regeneração de energia térmica em sistemas tem sido levada cada vez mais a sério por engenheiros e diretores empresariais. Kreith (2014) pondera que esse interesse vai além de retorno de energia reutilizada em processos, mas também em retorno de investimentos. Estão inseridos nesses parâmetros de aproveitamento outros fatores que estão conectados, como disponibilidade e quantidade de matéria prima necessária para o cumprimento de certos processos.

### 2.4.3 Transformação de energia térmica em energia elétrica

Segundo as contribuições de Incropera et al. (2008), a transição de calor devido a uma diferença de temperaturas no espaço é chamada de energia térmica. Estão consideradas como modos de transferência de calor as seguintes maneiras: condução, convecção e radiação.

A condução é uma transferência de calor que ocorre em sólidos, convecção em fluidos em movimento, quando estiver em diferentes temperaturas, e radiação em forma de ondas eletromagnéticas entre superfícies distintas. Ocorrem tais transferências de calor sempre do meio mais quente para o meio mais frio, sendo uma dissipação de energia térmica, na qual se tem possibilidade de transformação dessa energia em trabalho, segundo Incropera et al. (2008).

Assim, é possível considerar que energia gera trabalho, e trabalho necessita de potência. No entanto, Hibbeler (2011) salienta que essa potência é a capacidade de um equipamento realizar um trabalho em certo período de tempo.

Segundo Incropera et al. (2008), a potência é uma taxa com que se realiza um trabalho, ou quantidade que é produzido, transmitido ou utilizado. Contudo, é utilizado atualmente o Watt (W) para ser medida potência, sendo o mesmo que Joule/segundo (J/s). Dessa maneira, onde existir um gás ideal com possibilidade de variações de energias cinética e potencial desprezível – sendo, porém, o único trabalho realizado o de escoamento – utiliza-se a Equação (1).

Equação 1 – Aplicação para onde existir um gás ideal com possibilidade de variações de energias cinética e potencial desprezível

$$P = \dot{m} c_p (T_{sai} - T_{ent}) \quad (1)$$

Onde:

$P$  = Potência (W)

$\dot{m}$  = Vazão mássica (kg/s)

$c_p$  = Calor específico (J/kg. °C)

$T_{sai}$  = Temperatura de saída (°C)

$T_{ent}$  = Temperatura de entrada (°C)

Hibbeler (2011) destaca ainda, há possibilidade dessa equação ser usada para definir quantidade de energia que um corpo recebe, havendo assim um aquecimento, ou também para determinar quantidade de energia que um corpo perde, ou seja, o resfriamento deste corpo.

Na sequência, são apresentados os procedimentos metodológicos desta pesquisa, bem como o detalhamento dos equipamentos utilizados nos testes.

### **3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS**

Este capítulo trata da caracterização da pesquisa, seu delineamento e organização metodológica. Também é apresentado o local onde foram feitas as coletas de dados, o equipamento e demais procedimentos de análise.

#### **3.1 Caracterização da pesquisa**

Este estudo foi constituído de uma pesquisa experimental com abordagem quantitativa e descritiva, envolvendo levantamento de dados de forma transversal, a partir da obtenção de informações de variáveis em diferentes contextos, que, conforme Collis e Hussey (2005), complementam-se. A pesquisa experimental pode ser definida como aquela em que se determina um objeto de estudo e, de acordo com Gil (2010), selecionam-se as variáveis capazes de influenciá-lo; definem-se também as formas de controle e observação dos efeitos que a variável produz no objeto.

Quanto aos objetivos da pesquisa, são de caráter exploratório, obtidos por meio de avaliações efetuadas em um motogerador de energia, utilizando o biogás como combustível, em três diferentes composições. No entanto, é relevante deixar claro que qualquer processo de produção de energia não tem 100% de eficiência no sistema, havendo desperdícios de diversas maneiras pelos equipamentos.

Dessa forma, a pesquisa, além de se tratar de uma proposição relacionada à tecnologia limpa, sendo buscada pelo aproveitamento de biomassas residuais provenientes de outros processos para utilização na geração de energia, procura

contribuir ainda mais, minimizando essas perdas de energia pelo sistema, mais especificamente pelos gases de escape do motor; nessa dinâmica pode-se obter, além um melhor aproveitamento do insumo, que é a matéria orgânica, uma cooperação na questão econômica e, dessa forma, um incremento na eficiência do sistema.

### 3.2 Caracterização da área de estudo

Este estudo foi realizado nas dependências do Centro de Estudos de Biogás e Energias Renováveis (CEBER), no Campus da UNIVATES, em Encantado/RS, a 35 km da sede, em Lajeado/RS. O centro dispõe de estrutura específica para a realização de ensaios de digestão anaeróbia em escala piloto, com a possibilidade de expansão das avaliações para os usos do biogás gerado na planta piloto. A Figura 10 representa a planta piloto, em Encantado.

Figura 10 – Planta piloto de biogás que integra a estrutura do CEBER





A planta piloto de biogás é composta por um reator de 2 m<sup>3</sup>, construído em aço Inox 304, com capacidade de armazenamento de 2.000 L, sendo preenchido, para fins de teste, com 1.500 L de biomassa. Já na entrada da planta piloto, é possível encontrar o reservatório destinado à armazenagem de biomassa, antes ou após ser utilizada para a produção de biogás. A Figura 11 apresenta o referido reservatório.

Figura 11 – Reservatório para armazenagem de biomassa.



A entrada de material no reator ocorria pelo bombeamento da biomassa estocada em um tanque de equalização com capacidade de 2.000 L (mostrado na Figura 11), onde há uma bomba do tipo submersível, de 1 CV, trifásica (220 V/380 V), de rotor aberto, com capacidade de bombeamento de 7 L/s, modelo BCS 205, da marca Schneider. O material de descarte desse reator foi também acomodado temporariamente em um tanque de saída com as mesmas especificações técnicas do tanque de equalização.

Após ser bombeada do reservatório, onde está armazenada, a biomassa passava para um reator. Onde ocorreu alimentação da biomassa com óleos e gorduras realizada periodicamente com o auxílio de uma bomba dosadora. Nesse reator foram automatizados os processos de controle de temperatura, agitação, alimentação e monitoramento de volume de biogás produzido. A Figura 12 apresenta esse reator, no qual a entrada e a saída de biomassa ocorrem em batelada, pela inclusão de material no bocal localizado na parte superior do reator.

Figura 12 – Reator para produção de biogás



O biogás gerado nesse reator foi conduzido até o interior do prédio por meio de mangueiras trançadas de uma polegada, com capacidade de suportar até 250 PSI de pressão, passando por um sistema de medição de vazão de gás, modelo TG05/1, da marca Ritter – ver, na sequência, a Figura 13. Nesse sistema de medição de vazão,

é essencial observar os dados de desempenho do medidor de gás usado de acordo com a folha de dados fornecida pelo fabricante. A carga máxima de pressão para esse medidor de gás de tambor da versão utilizada é de 500 mbar (carcaça feita de aço inoxidável), conforme orientações do manual do fabricante. Esse aparelho efetuava a medição de 1 – 60 litros/hora.

Figura 13 – Medidor de vazão Ritter



Após passar pelo medidor de vazão, o biogás gerado foi canalizado para um gasômetro com volume de 200 m<sup>3</sup>, por meio de uma tubulação de *Polyvinyl Chloride* PVC de 60 mm. Esse gasômetro está representado na Figura 14. Além disso, existia no local um sistema de limpeza do biogás, um purificador e um gerador elétrico com trocador de calor acoplado.

Figura 14 – Gasômetro para armazenamento do biogás produzido



Desse modo, para sua estabilização, foram utilizadas cintas com regulagem por meio de catracas, para ajustar conforme o volume contido no gasômetro; também foram colocados em seu interior cerca de 2000 litros de água, para ajudar na fixação. O gasômetro foi instalado em uma base plana no CEBER, construído com geomembrana de Polietileno PEAD de 1,5 mm de espessura, resistente a raios UV, oxidações e impermeabilização.

Ao gasômetro estava conectado um *flare*, para queima, no caso de excedentes. O queimador de gases – ou *flare* – apresentado na Figura 15 é um equipamento em aço inox, com 3,5 m de altura, que conta com um centelhador automático e aterrado. Nele, há uma válvula manual, que é aberta sempre que há grande quantidade de gás estocado no gasômetro.

Figura 15 – *Flare* utilizado na queima de biogás excedente



Após sair do gasômetro, o biogás foi submetido a um processo de dessulfurização, que consiste na remoção do ácido sulfídrico ( $\text{H}_2\text{S}$ ). Dentre os vários métodos de remoção de  $\text{H}_2\text{S}$  para baixas vazões e teores máximos de 1.500 ppm, foi utilizado um removedor  $\text{H}_2\text{S}$  por adsorção regenerativa, com óxido de ferro III ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ). Utilizaram-se dois leitos de adsorção, em trabalho alternado, para adsorção ou para regeneração, com substituição anual da mídia de remoção de  $\text{H}_2\text{S}$ . A Figura 16 apresenta o dessulfurizador de biogás que foi utilizado. É importante salientar que a regeneração ocorre pela passagem de ar, auxiliada ou não com vapor de água, em função das oscilações do teor de  $\text{H}_2\text{S}$  do biogás a ser tratado.



Figura 16 – Dessulfurizador de biogás



Essa técnica consiste em fazer o biogás circular entre o óxido de ferro e, a partir deste contato, o gás sulfídrico fica retido ao reagir com o óxido de ferro (PRATI, 2010). A reação química que ocorre é explicitada da seguinte forma:  $Fe_2O_3 + 3H_2S = Fe_2S_3 + 3H_2O$ .

A capacidade nominal do removedor que foi utilizado é de 25 m<sup>3</sup>/h e 6 kVa de potência instalada, segundo informações do fabricante Janus & Pergher.

Após ser dessulfurizado, o biogás foi conduzido para a Central de Purificação (PSA). A purificação do biogás objetiva a remoção de umidade,  $\text{CO}_2$  e outros gases presentes em menores quantidades no biogás, com intuito de aumentar o seu poder calorífico, a partir da ampliação e da participação do metano na composição do biogás.

A Central de Purificação de Biogás instalada no CEBER foi fabricada por Janus & Pergher, em aço carbono galvanizado a fogo, com tubulações e válvulas de processo em aço inox e componentes elétricos a prova de explosão. A Figura 17 apresenta a central de purificação.

Figura 17 – Central de purificação por adsorção com modulação de pressão (PSA)



O purificador PSA utilizado no trabalho tem capacidade nominal de purificação do biogás de  $18 \text{ m}^3/\text{h}$  e a capacidade nominal de produção de biometano é de  $11 \text{ m}^3/\text{h}$ , com potência instalada requerida de  $4,05 \text{ kW/h}$  para todo sistema de limpeza e movimentação do biogás, até chegar ao motor. Sendo utilizado  $3,99 \text{ kW/h}$  para compressor e secador, e apenas  $0,064 \text{ Watts}$  para as 8 solenoides da PSA, na qual demandavam de  $0,008 \text{ Watts}$  cada uma delas.

A primeira etapa correspondeu à fase de dessulfurização efetuada pelo removedor de  $\text{H}_2\text{S}$ . A partir da obtenção do biogás com baixos teores de enxofre (dessulfurizado), entrou-se na segunda etapa, que foi pressurização para ser filtrado e desumidificado, permitindo uma melhor eficiência do adsorvedor para, a remoção do dióxido de carbono e a secagem do metano. Na terceira etapa, utilizou-se o processo de separação *Pressure Swing Adsorption* (PSA), com o intuito de remover  $\text{CO}_2$  e  $\text{O}_2$  por meio da diferença de velocidade de difusão entre os gases, promovendo a separação e a obtenção do biometano.

Foram utilizados dois leitos de adsorção, pressurizando-se um deles com biogás contendo a mistura gasosa, que vai sendo separada até a saturação desse mesmo leito com os gases retidos. Na sequência, desviou-se o fluxo de biogás para um segundo leito, repetindo o procedimento anterior e assim sucessivamente até a obtenção da qualidade desejada.

O controle das características do biogás relativas ao teor de metano foi feito por meio de um analisador em linha acoplado ao equipamento e, em situações específicas, por meio de um analisador portátil denominado Biogas 5000 (Geotech). A Figura 18 apresenta o analisador portátil referido.

Figura 18 – Analisador portátil Biogás 5000 (Geotech)



Fonte: Laboratório de Biorreatores.



Verificado o teor de metano adequado às faixas propostas de avaliação, cessou-se a purificação, pressurizando-se e armazenando-se o gás nos cilindros disponíveis para posterior utilização no gerador.

A obtenção dos dados de energia consumida no processo de purificação deu-se por meio de leituras de consumo de energia pelo sistema de limpeza e purificação do biogás, e a quantidade de gás utilizada em cada um dos testes foi quantificada por um medidor de vazão tipo rotâmetro (ver Figura 19), instalado junto ao gerador de energia. O valor da energia foi fixado a partir da utilização de motores e do consumo pela planta piloto em cada um dos testes.

Figura 19 – Rotâmetro para medir vazão de biogás



O rotâmetro instalado para utilização na pesquisa tem capacidade máxima de 50 Nm<sup>3</sup>/h, com possibilidade de pressão máxima de 5,0 kgf/cm<sup>2</sup>. Contém um flutuador interno, que tem sua altura variada de acordo com a correspondente vazão utilizada.

A leitura foi realizada diretamente sobre uma escala gravada em baixo relevo no cone de medição; dessa forma, foi possível efetuar a medição de consumo pelo motogerador.

Para a geração de energia elétrica, foi utilizado, na avaliação, um gerador com capacidade de 60 kVA de potência principal (40 kW de carga efetiva), acoplado a um motor CHP60 com 4 cilindros em linha. A Figura 20 apresenta o motogerador utilizado na pesquisa, ligado ao trocador de calor, em que foram feitas as análises de energia térmica.

Figura 20 – Motogerador a biogás com trocador de calor



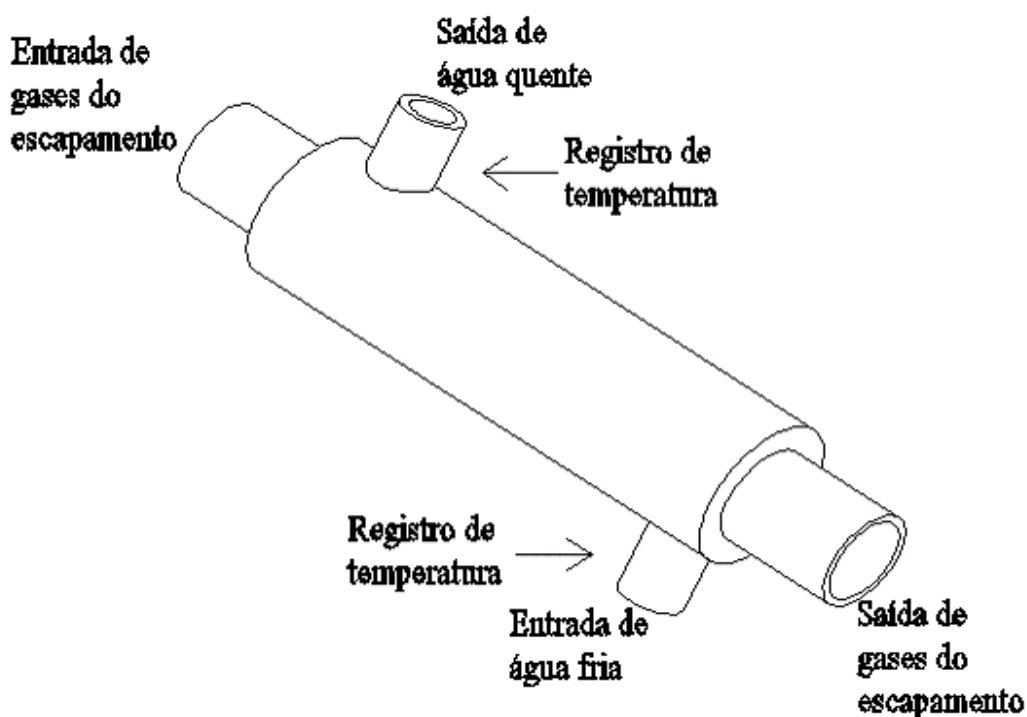
O motogerador CHP60 também possui um regulador eletrônico de velocidade, sendo refrigerado por trocador de calor (radiador), que também pode ter aproveitamento da água de refrigeração do motor para geração de água quente (CHP BRASIL, 2017).

Acoplado ao gerador, foi instalado um trocador de calor, que é um dispositivo utilizado para resfriar o ar de exaustão do motor por meio da transferência de calor de um meio para outro (ar – água). O fluido utilizado para o resfriamento é a água, monitorada em relação à sua vazão (medidor específico), temperatura de entrada e

temperatura de saída do sistema (sensor PT-100 e *data logger*). Estas informações combinadas permitem identificar a quantidade de energia envolvida no processo, ou seja, a quantidade de energia térmica gerada.

A Figura 21 ilustra o sistema de avaliação que foi utilizado nos três cenários, para a quantificação da energia térmica gerada a partir do aproveitamento do calor do motor.

Figura 21 – Pontos de monitoramento para a quantificação de energia térmica



As avaliações propostas para cada teste foram feitas com coletas de três em três minutos, no período de cada teste. Cabe destacar que foi utilizada a quantidade de biogás à disposição, com o intuito de garantir precisão nas informações e reduzir equívocos.

### 3.3 Coleta dos dados

A coleta dos dados levou em consideração o percentual de metano, consumo de biogás pelo motogerador e geração de energia elétrica. Os dados foram coletados de três em três minutos no período de cada teste, após foi calculada a média para cada item definido, o respectivo desvio padrão e determinado o coeficiente de variação da amostra.

Para a geração de energia térmica foi averiguada a vazão de água que circulou no interior do trocador de calor no período de cada teste, e a variação de temperatura, foi registrada no *data logger* na qual foi coletado os registros também de três em três minutos como nos demais dados.

O biogás produzido na planta piloto foi purificado em três percentuais diferentes na composição de metano: no primeiro trabalho de coleta de dados, o biogás utilizado foi bruto, apenas dessulfurizado, o que significa que foi retirado apenas ácido sulfídrico ( $H_2S$ ). Nessa primeira análise, a purificação do biogás tem possibilidade de estar com um percentual de biometano na faixa de 60-80%, com o qual já é possível o funcionamento do motogerador.

Na segunda etapa de coleta de dados, o biogás passou, além do dessulfurizador, também pelo purificador (PSA) e o percentual atingido de biometano pode entrar em uma faixa de 80-90%; nessa etapa, existe a possibilidade de utilização até como combustível veicular, no entanto a legislação não permite ainda nessa porcentagem.

Na terceira etapa, o biogás foi dessulfurizado como nas outras etapas e purificado, contendo teor de metano superior a 90%, já existindo, desse modo, possibilidade de utilização como combustível veicular por sua semelhança com GNV.

Em torno desses três cenários, foram realizados os levantamentos de dados conforme descrito na Tabela 1, identificando a quantidade de energia consumida pelos equipamentos (kWh) para fazer a purificação em cada um dos testes, a quantidade de biogás consumido pelo motor, a quantidade de energia elétrica produzida no gerador interligado (kWh) ao motor de combustão e a quantidade de energia térmica

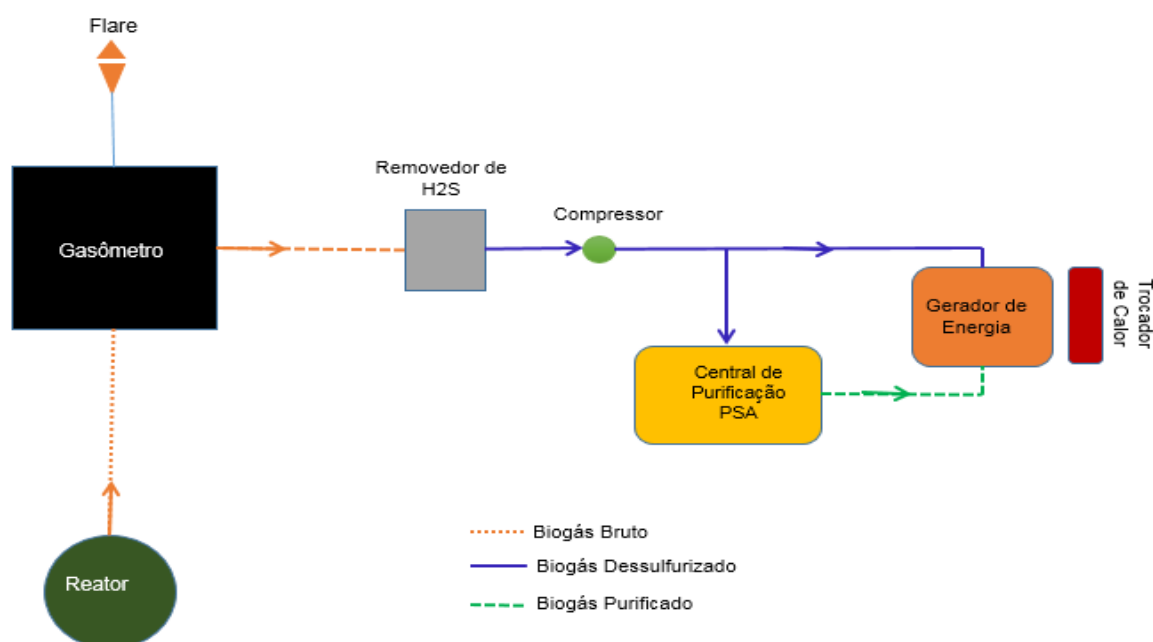
gerada (kWh) no trocador de calor acoplado aos gases de escape pela transferência de temperatura entre os gases e a água que circula no interior do equipamento.

Tabela 1 – Levantamento de dados da pesquisa

	Teor de Metano (%)	Energia Consumida na purificação	Quantidade de biogás utilizada (m <sup>3</sup> /h)	Energia Elétrica Gerada (kWh)	Energia Térmica Gerada (kWh)
Teste I	60 – 80	X	XX	XXX	XXXX
Teste II	80 – 90	Y	YY	YYY	YYYY
Teste III	>90	Z	ZZ	ZZZ	ZZZZ

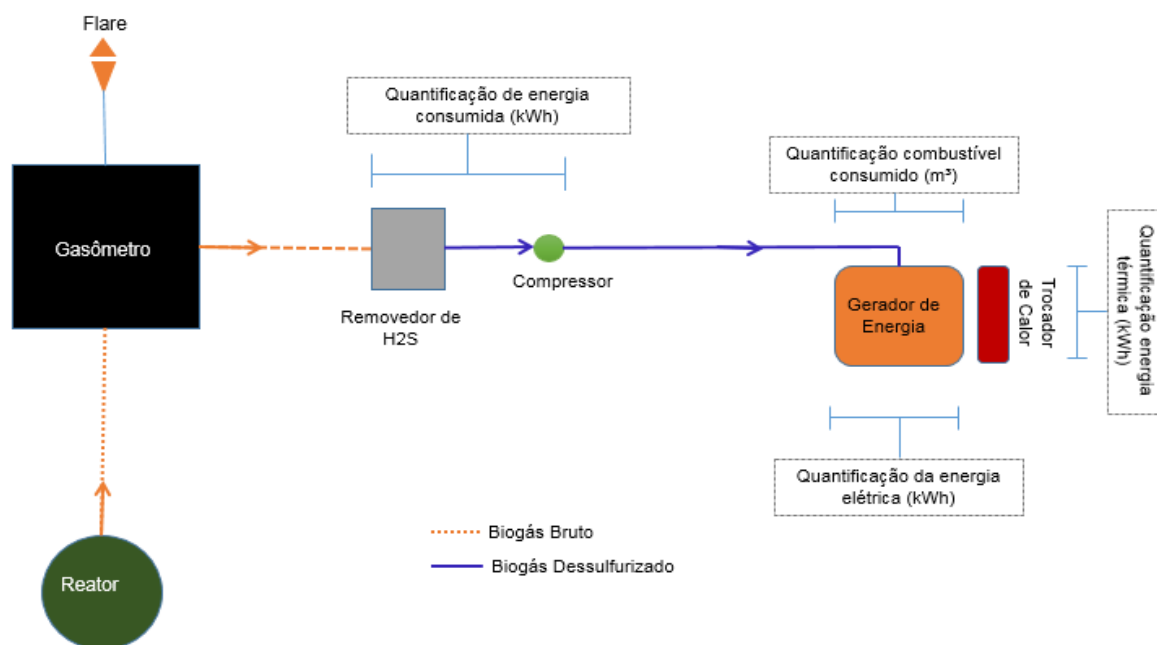
As incógnitas representadas na Tabela 1 pelas letras X, Y e Z são os valores a serem mensurados por meio da avaliação que se propõe nesta pesquisa, com o objetivo de investigar o cenário mais favorável em relação ao custo-benefício do processo de purificação do biogás.

Figura 22 – Representação gráfica do caminho percorrido pelo biogás



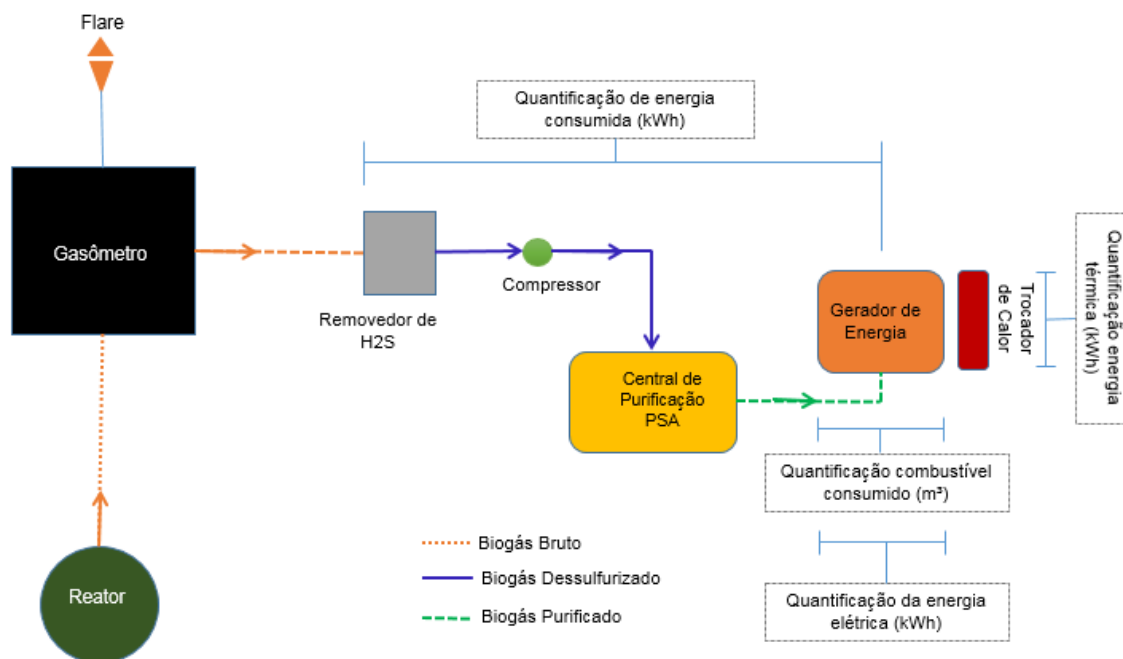
O biogás produzido nos reatores foi conduzido até o gasômetro (armazenamento) e, na sequência, para o sistema de dessulfurização, visando a possibilitar a remoção do gás sulfídrico tipicamente presente no biogás. No Cenário I, saindo do processo de dessulfurização, o biogás percorreu o caminho diretamente para o gerador elétrico, onde ocorreram as avaliações, conforme detalhado na Figura 23.

Figura 23 – Representação gráfica da avaliação para o Cenário I



Nos Cenários II e III, o biogás foi conduzido para a Central de Purificação, na qual foi purificado até as porcentagens desejadas em cada um dos cenários e, então, conduzido para as avaliações no gerador elétrico, conforme representação da Figura 24.

Figura 24 – Representação gráfica da avaliação para os Cenários II e III



As informações registradas durante as avaliações foram processadas em planilha de cálculo que permitiu a elaboração de tabelas, para visualização dos resultados obtidos para cada cenário. Optou-se pela análise das seguintes variáveis: consumo de energia pelo sistema, consumo de biogás pelo conjunto motogerador e a produção de energia elétrica e térmica em cada teste realizado.

### 3.4 Equações utilizadas para as averiguações dos testes

No cálculo de potência térmica gerado no trocador de calor acoplado ao escapamento do motogerador, foi utilizada a Equação (1), já mencionada no capítulo anterior. Nesse caso, Incropera et al. (2008) expõe que a razão entre a quantidade de calor e a variação de temperatura é a capacidade térmica ou potência térmica de um sistema.

Para obtenção do resultado de energia elétrica gerada no período de cada

teste, foi utilizado a relação entre a carga de energia que estava sendo empregada na rede e demonstrada no painel de controle, pela vazão de biogás média consumido pelo motogerador.

É apresentada, em seguida, a Equação 2, da qual resultaram os valores de energia elétrica gerados nos testes.

Equação 2 – Equação de geração de energia elétrica no período de teste

$$E = C / Q_{gás} \quad (2)$$

Onde:

$E$  = energia elétrica (kWh/m<sup>3</sup>)

$C$  = carga de energia (kW)

$Q_{gás}$  = vazão de biogás (Nm<sup>3</sup>/h)

A obtenção do resultado da eficiência do sistema de geração de energia por meio do biogás foi possível a partir do Poder Calorífico Inferior (PCI) em cada percentual de metano. Na Tabela 2 temos, a partir de Rosseto (2014), as características de PCI do biogás para certas taxas de metano.

Tabela 2 – Valores do PCI em relação à composição do biogás

Composição química do biogás	Peso específico (kg/Nm <sup>3</sup> )	P.C.I (KCAL/KG)
10% CH <sub>4</sub> , 90% CO <sub>2</sub>	1,84	465,43
40% CH <sub>4</sub> , 60% CO <sub>2</sub>	1,46	2.338,52
60% CH <sub>4</sub> , 40% CO <sub>2</sub>	1,21	4.229,98
65% CH <sub>4</sub> , 35% CO <sub>2</sub>	1,15	8.831,14
75% CH <sub>4</sub> , 25% CO <sub>2</sub>	1,03	6.253,01
95% CH <sub>4</sub> , 05% CO <sub>2</sub>	0,78	10.469,60
99% CH <sub>4</sub> , 01% CO <sub>2</sub>	0,73	11.661,02

Fonte: Rosseto, 2014.

No próximo capítulo será apresentada a análise dos resultado, bem como a geração de energia elétrica e térmica, além da eficiência obtida em cada teste realizado.



## **4 RESULTADOS E DISCUSSÃO**

Neste capítulo, será apresentado os resultados da pesquisa na etapa inicial de purificação do biogás; em seguida, o que foi gerado de energia elétrica em cada teste; após, a geração de energia térmica extraída do trocador de calor empregado no trabalho; e, por fim, o resultado da relação da eficiência na geração de energia elétrica e térmica obtida em cada teste.

### **4.1 Resultado da etapa de purificação do biogás em três concentrações de CH<sub>4</sub>**

Fazer a purificação do biogás para três percentuais diferentes de metano em sua composição foi o que se estabeleceu como primeiro objetivo específico. O primeiro teste foi obtido por meio do biogás bruto, ou seja, apenas dessulfurizado, o que consistiu em sua passagem exclusivamente pelo dessulfurizador para retirada do H<sub>2</sub>S. Neste teste, a média dos valores da concentração de metano ficou em 68,54%, com um desvio padrão de 4,02, gerando um coeficiente de variação de 5,86%, o que representa baixa variabilidade dentro dos critérios estatísticos.

No segundo teste de análise da quantidade de metano no biogás, buscou-se elevar esse percentual em um nível intermediário no processo de purificação. Nessa etapa dos testes, o biogás, além de ter sido dessulfurizado, teve sua passagem submetida à PSA em apenas um estágio, que consistia nas três primeiras colunas das seis que compõem o processo completo. Neste teste a média de metano no biogás ficou em 83,46%, apresentando um desvio padrão de 2,43, comprovando um pequeno grau de dispersão no valor de 2,91%.

Para o terceiro teste, o biogás teve, então – além da dessulfurização que aconteceu nos testes anteriores –, sua passagem por toda PSA, ou seja, pelas seis colunas de purificação, em que o percentual de metano foi elevado a ponto de ser utilizado como combustível veicular, ou injetado nas redes de gás natural. Neste teste a média da concentração de metano foi de 92,33%, com desvio padrão de 1,34, gerando um coeficiente de variação de 1,45%, demonstrando novamente um pequeno grau de dispersão.

Respondendo àquilo que era pretendido com o primeiro objetivo específico da pesquisa, as etapas de purificação atenderam devidamente. Nesta etapa do trabalho, é possível observar de que as tecnologias empregadas para a purificação do biogás foram satisfatórias. A Tabela 3 apresenta os três resultados obtidos em cada teste.

Tabela 3 – Resultados dos três estágios de purificação do biogás no trabalho

Teste	Concentração de CH <sub>4</sub>
I	68,54%
II	83,46%
III	92,33%

Após a passagem do biogás pelas etapas de purificação, seguiu-se para o motogerador, para combustão e geração de energia elétrica e térmica. Atendendo ao segundo objetivo específico do trabalho, na geração de energia elétrica no motogerador movido a biogás em três percentuais diferentes de metano, a seguir são apresentados os resultados da produção de energia elétrica em cada etapa.

#### **4.2 Resultado da geração de energia elétrica no motogerador em três condições de metano no biogás**

Atendendo ao segundo objetivo específico deste trabalho que são apresentados os resultados quantificados da geração de energia elétrica proveniente do biogás em três concentrações diferentes de metano em sua composição.

O resultado da produção de energia elétrica por metro cúbico (kWh/m<sup>3</sup>), seguiu o mesmo critério utilizado anteriormente, sendo, no primeiro teste, utilizado o biogás apenas dessulfurizado; no segundo teste, considerado como intermediário, por se tratar da concentração de metano que esteve entre as etapas de purificação, a geração demonstrou-se um pouco maior do que no primeiro; e, no terceiro teste, em que o biogás foi purificado obtendo-se o percentual de metano acima de 90%, foi obtida uma produção de energia superior aos resultados anteriores.

A produção de energia elétrica nos testes demonstrou-se em elevação, conforme o percentual de metano. Isso pelo fato de diminuir o consumo de biogás pelo motor, o que será mostrado mais adiante, conforme se aumentou o teor de metano. Os resultados da geração de energia elétrica nos três testes realizados são demonstrados na Tabela 4.

Tabela 4 – Produção de energia elétrica alcançada em cada teste realizado

Teste	Geração de energia elétrica com biogás (kWh/m <sup>3</sup> )
I	2,04
II	3,21
III	3,57

O aumento da geração de energia elétrica, como apresentado anteriormente, deve-se pela relação do consumo de biogás em cada teste. Conforme o teor de metano aumenta, aumenta também o poder calorífico do biogás. Dessa maneira, a demanda de biogás pelo motor vai diminuindo. A Tabela 5 evidencia a redução no consumo de biogás conforme aumenta o percentual de metano.

Tabela 5 – Consumo de biogás em cada teste

Teste	CH <sub>4</sub>	Consumo (Nm <sup>3</sup> /h)
I	68,54%	4,46
II	83,46%	3,02
III	92,33%	2,27

Na sequência, é apresentada a geração de energia térmica obtida em cada teste, como uma melhora no sistema por meio do aproveitamento da energia desperdiçada no escapamento do motor.

#### **4.3 Resultado da geração de energia térmica com percentuais diferentes de metano no biogás**

Estabelecido como o terceiro objetivo específico do trabalho, o resultado da geração de energia térmica aproveitada com o emprego do trocador de calor acoplado ao escapamento do motor para melhor aproveitamento da energia do biogás, houve semelhante elevação da geração de energia térmica, com a geração de energia elétrica, conforme o teor de metano aumentava. Uma comparação entre os testes está apresentada na Tabela 6, onde pode ser observada pelos valores na produção de energia térmica.

Tabela 6 – Comparação da produção de energia térmica gerada pelo trocador de calor em cada teste

Teste	Geração de energia térmica com biogás (kWh/m <sup>3</sup> )
I	1,15
II	1,57
III	1,67

Percebe-se que, entre os resultados, houve um pequeno aumento na geração de energia térmica, mesmo que pouca, mas atestando que conforme aumenta a purificação, melhora o resultado da produção de energia térmica. Porém, deve-se deixar claro que mesmo não havendo uma conexão direta entre a purificação e a geração, esta última pode ser associada à redução no consumo de biogás pelo motor. Ainda que se tenha gerado gradativamente mais energia elétrica e térmica conforme aumentava o teor de metano, sobra energia para ser utilizada. Esses valores estão apresentados na Tabela 7, representando o potencial da quantidade de energia elétrica que se tem armazenado conforme cada teor de metano.

Tabela 7 – Potencial de energia obtida do biogás em cada teste

Teste	%CH <sub>4</sub>	kcal/kg	kWh/m <sup>3</sup>
I	68,54	5.334,49	6,20
II	83,46	8.036,63	9,34
III	92,33	8.353,04	9,71

Os potenciais valores de energia apresentados no biogás com os devidos percentuais de metano em suas constituições evidenciam que ainda existe possibilidade de melhoras nos sistemas para chegar a resultados mais próximos.

Em seguida, serão apresentados os resultados de eficiência alcançada em cada teste com o biogás.

#### **4.4 Relação da eficiência na geração de energia elétrica e térmica gerada em cada teste realizado com biogás**

O quarto objetivo específico propôs uma relação da energia consumida com relação à energia elétrica e térmica gerada por meio do biogás, com diferentes percentuais de metano em cada teste. Primeiramente será apresentado os resultados da energia que era consumida pela planta piloto no momento de cada teste, juntamente com a energia consumida pelo sistema de tratamento e compressão do biogás no motogerador. Já foi mencionado no item 3.2 que para utilização total do sistema de dessulfurização, purificação e compressão, o sistema demandava de um potencial de 4,05 kW/h.

A Tabela 8 mostra o consumo de energia que estava sendo utilizado pela planta e, assim, produzido pelo gerador, e o que estava sendo demandado pelo sistema de dessulfurização e compressão.

Tabela 8 – Energia utilizada pela planta piloto e energia utilizada pelo sistema

	Potência demandada pela planta (kW/h)	Potência demandada pelo sistema (kW/h)
Teste I 68,54% CH <sub>4</sub>	26,05	3,99
Teste II 83,46% CH <sub>4</sub>	32,34	4,02
Teste III 92,33% CH <sub>4</sub>	32,47	4,05

O consumo de energia demandado pelo sistema no primeiro teste, que foi para movimentação e dessulfurização do biogás era de 3,99 kW/h, na qual diz respeito ao compressor e secador de biogás.

A demanda de energia pelo sistema no segundo teste foi para movimentação, dessulfurização, e passagem por três, das seis colunas que compõe a PSA. Nessa etapa a demanda de energia era os 3,99 kW/h como foi empregado no primeiro teste, mais 0,032 Watts de quatro das oito solenoides que integram a PSA, elevando o consumo de energia do processo para 4,02 kW/h

Para o terceiro teste, a demanda de energia pelo sistema completo que era a movimentação, dessulfurização, e purificação com passagem do biogás pelas seis colunas da PSA era de 4,05 kW/h. Havendo um acréscimo de 0,032 Watts de mais três solenoides que constituem a PSA

Após ser demonstrada a potência que foi utilizada pelo processo em cada teste, foi analisada a eficiência dos testes em relação ao potencial de energia contido no biogás, para cada teste. Apresentado na Tabela 7, o potencial de energia existente no biogás para cada percentual de metano que se obteve em cada teste, dessa forma, foi relacionado com a geração de energia térmica e elétrica.

No primeiro teste, onde a concentração de CH<sub>4</sub> foi de 68,54%, o potencial de energia presente no biogás era de 6,20 kW/h/m<sup>3</sup>. Dessa quantidade toda foi gerado 2,04 kWh/m<sup>3</sup> de energia elétrica, o que representa 32,90% do potencial existente. Para a geração de energia térmica gerada pelo trocador de calor que foi de 1,15 kWh/m<sup>3</sup>, representa uma parcela de 18,55% de todo o potencial que havia no biogás para esse teste. Nesse teste foi possível chegar em uma conversão de 51,45% da energia que havia no biogás.

Em relação ao segundo teste no qual o biogás teve 83,46% de CH<sub>4</sub>, a energia contida com esse percentual é de 9,34 kWh/m<sup>3</sup>. Foi gerado de energia elétrica no gerador 3,21 kWh/m<sup>3</sup>, representando o valor de 34,37% do potencial que havia no biogás. Na geração de energia térmica o valor foi de 1,57 kWh/m<sup>3</sup>, equivalendo ao valor de 16,81% do que havia no biogás, resultando em uma taxa de conversão de 51,18% da capacidade que estava contida no biogás para este teste.

Com relação ao terceiro teste, que teve concentração de CH<sub>4</sub> em 92,33%, a quantidade de energia existente era de 9,71 kWh/m<sup>3</sup>, desse potencial a geração de energia elétrica foi de 3,57 kWh/m<sup>3</sup>, ou seja, converteu em elétrica 36,77%. A energia térmica gerada foi de 1,67 kWh/m<sup>3</sup>, o que representa 17,20% da energia que havia para esse percentual de metano. Assim, a conversão total desse teste foi de 53,97%, de toda energia que estava presente no biogás. A Tabela 9 exibe um inventário do potencial de energia contido no biogás em relação à energia gerada por metro cúbico de biogás.

Tabela 9 – Avaliação do potencial de energia no biogás em cada teste

	Concentração de CH <sub>4</sub> (%)	Potencial de geração (kWh/m <sup>3</sup> )	Energia elétrica gerada (kWh/m <sup>3</sup> )	Eficiência da geração (%)	Energia térmica gerada (kWh/m <sup>3</sup> )	Eficiência da geração (%)	Total de energia gerada (kWh/m <sup>3</sup> )	Eficiência total da geração (%)
Teste I	68,54	6,20	2,04	32,90	1,15	18,55	3,19	51,45
Teste II	83,46	9,34	3,21	34,37	1,57	16,81	4,78	51,18
Teste III	92,33	9,71	3,57	36,77	1,67	17,20	5,24	53,97

A seguir será apresentado a discussão dos resultados relacionando-os com outras pesquisas envolvendo geração de energia por meio do biogás. As informações coletadas nos testes foram calculadas usando o *software Microsoft Office Excel*, e não foram consideradas as perdas nos componentes do sistema.

#### 4.5 Discussão dos resultados

Este trabalho apresentou, por meio dos testes realizados no Centro de Estudos de Biogás e Energias Renováveis (CEBER), no campus da Univates em Encantado/RS, Brasil, resultados que, além de possibilitar a expansão do uso do biogás como uma fonte alternativa de energia, com imenso potencial não só no Estado do Rio Grande do Sul, mas em grande parte do território nacional e internacional, mostram como o aproveitamento de resíduos urbanos, industriais, de agroindústrias, entre outros, podem ser utilizados na produção do biogás.

No aproveitamento do biogás proveniente do tratamento de resíduos, outras pesquisas também podem ser citadas, como de Perecin (2017) destacou o aproveitamento, por meio da geração de energia elétrica ou pela produção de biometano, combustível obtido pela purificação do biogás e que é similar ao gás natural. Nesse contexto, o objetivo do trabalho foi detalhar essas estratégias e compará-las para o caso brasileiro. O autor buscou identificar o uso mais desejável do biogás no contexto do setor energético nacional, considerando as características da fonte e sua relação com a situação atual e as perspectivas dos mercados de eletricidade e gás.

Tratando-se, da utilização do biogás para geração de energia elétrica, o presente trabalho apresentou resultados superiores a pesquisa de Rodrigues (2006), que teve como objetivo analisa o mercado de distribuição de energia, leilões e geração distribuída, apresentou o valor de 1,43 kWh/m<sup>3</sup> na geração de energia elétrica.

Resultados parecidos com relação ao estudo de Costa (2006), que fez análises comparativas em seu trabalho entre microturbinas e grupo motogerador para geração de energia elétrica, obtendo os seguintes resultados: para microturbina, a geração de energia elétrica foi de 0,64 kWh/m<sup>3</sup>, enquanto que para motogerador foi de 2,50 kWh/m<sup>3</sup>.

A presente pesquisa apresentou resultados superiores ao estudo de Martinez (2013), realizado no município de São Miguel do Iguaçu, que objetivou avaliar a geração de energia elétrica com biogás proveniente de dejetos suínos, utilizando um motogerador com potência nominal de 105 kW, que alcançou o resultado de 1,41



kWh/m<sup>3</sup> de biogás. Superiores também com relação à pesquisa de Santos (2013), que avaliou dejetos de animais como fonte de energia para redução das emissões de GEE, na qual obteve geração de energia elétrica de 1,30 kWh/m<sup>3</sup> de biogás com 60% de metano.

Do mesmo modo, a presente pesquisa alcançou valores de geração de energia elétrica superiores o estudo feito por Whiting (2014), com objetivo de apresentar os impactos ambientais em um ciclo de vida no processo de produção de biogás, onde os resultados mostram reduções significativas dos impactos em comparação aos combustíveis fosseis, menciona que em uma usina de biogás e cogeração de eletricidade no Reino Unido, a geração é de 1,46 kWh/m<sup>3</sup> de energia elétrica.

Resultado mais parecido obteve-se com o estudo Yingjian (2014), que averiguou a eficiência na geração de energia elétrica, empregando motor de combustão interna com potência nominal de 80 kW, o biogás com 71 % de metano, o valor de geração alcançando foi de 2,00 kWh/m<sup>3</sup> e eficiência de 28,45% na geração de energia elétrica.

A pesquisa também mostrou resultados superiores ao trabalho de Mello (2018), que avaliou a geração de energia elétrica no tratamento de efluentes da lavagem de caminhões de coleta de resíduos sólidos municipais, na qual foram feitas quatro avaliações dos efluentes em um motogerador com capacidade de 3,6 kVA de potência nominal, apresentando em cada uma delas os seguintes percentuais de metano, 65%, 50%, 53% e 50%, alcançando uma geração de 1,44 kWh/m<sup>3</sup>, 1,43 kWh/m<sup>3</sup>, 1,45 kWh/m<sup>3</sup>, e 1,44 kWh/m<sup>3</sup> respectivamente.

Assim também como foram parecidos os resultados com os apresentado por Coser et al. (2015), que fez algumas comparações na geração de energia elétrica com o biogás em diferentes motores e diferentes percentuais de metano. Deve-se observar que entre os Testes I e IV, aparecem dados que se assemelham com o presente trabalho, os critérios como, motores de 30 e 50 kVA no estudo de Coser et al. (2015), com o de 60 kVA empregado por esta pesquisa. Da mesma forma os demais fatores como concentração de metano (autor 60% a 75%), (presente trabalho 68,54% a 92,33%) e principalmente a geração de energia elétrica. Onde o presente estudo apresenta de 2,04 a 3,57 kWh/m<sup>3</sup>, e na Tabela 10 apresenta os resultados dessas

gerações para o autor.

Tabela 10 – Geração de energia elétrica com diferentes motores

Teste	Teor de metano no biogás (%)	Potência do motor (kVA)	Geração de energia (kWh/m <sup>3</sup> )
I	60	30	1,54
II	75	30	2,85
III	60	50	1,28
VI	75	50	3,20
V	60	80	1,34
VI	75	80	2,50
VII	60	120	1,37
VIII	75	120	1,97
IX	60	420	2,27
X	75	420	3,22

Fonte: Coser et al. (2015).

Diante de outros trabalhos já publicados referentes ao uso do biogás, pode-se inferir que esta pesquisa apresenta resultados semelhantes para produção de energia elétrica. Sendo demonstrado na Tabela 11 valores da geração de energia elétrica por meio do biogás em alguns trabalhos realizados.

Tabela 11 – Relação de energia elétrica entre este trabalho e outros autores

Autor	Teor de CH <sub>4</sub> (%)	Potência do motor ((kW-kVA)	Geração de energia elétrica (kWh/m <sup>3</sup> )
Rodrigues (2006)	-	-	1,43
Costa (2006)	-	-	2,50
Martinez (2013)	-	105 kW	
Santos (2013)	60,00	-	1,30
Whiting (2014)	-	-	1,46
Yingjian (2014)	71,00	80 kW	2,00
Coser et al. (2015)	60,00	30 kVA	1,54
Coser et al. (2015)	75,00	30 kVA	2,85
Coser et al. (2015)	60,00	50 kVA	1,28
Coser et al.(2015)	75,00	50 kVA	3,20
Mello (2018)	65,00	3,60 kVA	1,44
Mello (2018)	50,00	3,60 kVA	1,43
Mello (2018)	53,00	3,60 kVA	1,45
Mello (2018)	50,00	3,60 kVA	1,44
Presente trabalho Teste I	68,54	60 kVA	2,04
Presente trabalho Teste II	83,46	60 kVA	3,21
Presente trabalho Teste III	92,33	60 kVA	3,57

Fazendo uma conexão com alguns resultados apresentados anteriormente na Tabela 11 entre os testes de Coser et al.(2015) e os do presente trabalho, é possível observar semelhança quanto ao aumento da performance de geração conforme aumenta a concentração de CH<sub>4</sub>. As sínteses das pesquisas relatadas nesta seção apresentaram resultados favoráveis ao uso do biogás para geração de energia elétrica.

Porém, quando se buscou por trabalhos que, ao utilizarem energia térmica do biogás, fizessem a conversão em energia elétrica, encontrou-se menção à energia térmica para substituição ao Gás Liquefeito de Petróleo (GLP), para aquecedores de água, para limpeza de salas de ordenhas, secadores de grãos, caldeiras, entre outros. Apenas no trabalho de Whiting (2014) apresenta-se o valor da geração de energia térmica. A Tabela 12 apresenta a relação entre os valores do presente trabalho com o resultado de Whiting (2014) na geração de energia térmica.

Tabela 12 – Apresentação da energia térmica do presente trabalho e outro autor.

Autor	Teor de CH <sub>4</sub> (%)	Geração de energia térmica (kWh/m <sup>3</sup> )
Whiting (2014)	-	2,00
Presente trabalho Teste I	68,54	1,15
Presente trabalho Teste II	83,46	1,57
Presente trabalho Teste III	92,33	1,67

O resultado apresentado por Whiting (2014) para geração de energia térmica, expõe certa superioridade aos resultados alcançados no presente trabalho, demonstrando que é possível melhorar os resultados de energia térmica com melhores estratégias de captação, como por exemplo, empregando equipamentos fabricados com materiais de maior condutividade térmica.

Entretanto, alguns trabalhos apontam geração difusa de energia, ou seja, não explanam se é geração elétrica, térmica, ou cogeração, aparecem nos estudos feitos por Almeida (2008), expondo que o biogás com teor de metano entre 50 a 80% pode gerar de 5,00 a 7,00 kWh/m<sup>3</sup>. Salomon (2009), expõe em seu trabalho valores de geração de energia na faixa de 6,25 a 10,00 kWh/m<sup>3</sup> de geração com o biogás na faixa de 35.800 kJ/m<sup>3</sup>. No trabalho de Budzianowski (2015), relata que o melhoramento energético do biogás bruto capturando o CO<sub>2</sub> possibilita melhor eficiência na conversão de energia, por consumir no processo de 0,2 a 0,5 kWh/m<sup>3</sup> de todo energético contido no biogás, que pode chegar numa geração de até 6,00 kWh/m<sup>3</sup>.

Quantificando o potencial do biogás proveniente de folhas de chá na co-digestão com esterco de bovinos, Khayum (2018) fez as análises com cinco diferentes proporções de misturas, 50:50, 40:60, 30:70, 20:80, 0:100, colocadas em cinco diferentes digestores. A Tabela 13 apresenta os resultados de cada teste para a concentração de metano e o valor de energia para cada proporção.

Tabela 13 – Proporção de metano e potencial de energia em cada teste.

Teste	Concentração de CH <sub>4</sub> (%)	Energia gerada (kWh/m <sup>3</sup> )
I	61,20	3,30 - 4,10
II	66,80	3,90 - 4,80
III	71,00	5,10 - 5,70
IV	68,00	4,10 - 5,20
V	50,00 – 70,00	4,00 - 4,50

Fonte: Khayum, 2018.

Considera-se que apenas o trabalho de Whiting (2014) corrobora com os resultados, isso em virtude das outras pesquisas como Almeida (2008) com o valor de 5,00 a 7,00 kWh/m<sup>3</sup>, Salomon (2009) com faixa de 6,25 a 10,00 kWh/m<sup>3</sup>, Budzianowski (2015) que apresenta possibilidade de geração de 6,00 kWh/m<sup>3</sup> e os resultados de Khayum (2018). No qual acredita ser a soma da produção de energia térmica e elétrica pelos valores apontados pelos autores mencionados.

Tratando-se da questão de eficiência do presente trabalho para a geração de energia elétrica, foi possível certificar-se de que o trabalho está de acordo com outros estudos, como de Pipatnomanai et al. (2009), Whiting (2014) e Xavier (2016), que empregou oito diferentes motores Cartepillar para seus testes. Já em relação ao trabalho de Silva (2017), demonstrou menor eficiência para geração de energia elétrica.

Na geração de energia térmica, não teve nenhuma relação de eficiência com outros trabalhos, considerando que tenha sido pela maneira utilizada, sendo para aquecimento, lavagem, substituição ao GLP, entre outros, tornando-se provável irrelevância nesta verificação. A Tabela 14 apresenta os resultados da eficiência de alguns trabalhos e do presente trabalho para geração de energia elétrica e a eficiência desta pesquisa na geração de energia térmica com biogás.

Tabela 14 – Eficiência na geração de energia elétrica com biogás

Autor	Motor (modelo)	Concentração de CH <sub>4</sub> (%)	Eficiência na geração de energia elétrica (%)	Eficiência na geração de energia térmica (%)
Pipatnomanai et al. (2009)	-	60,00	20,80	-
Whiting (2014)	-	-	39,00	-
Yingjian (2014)	90GFAT	71,00	28,45	-
Silva (2017) (carga máxima 100%)	MWM 6.12T	68,30	17,00	-
Silva (2017) (carga média 50%)	MWM 6.12T	68,30	14,30	-
Xavier (2016)	G3406	-	31,39	-
Xavier (2016)	G3412	-	28,39	-
Xavier (2016)	G3508	-	30,74	-
Xavier (2016)	G3512	-	30,45	-
Xavier (2016)	G3516	-	30,92	-
Xavier (2016)	G3608	-	36,36	-
Xavier (2016)	G3516	-	35,23	-
Xavier (2016)	G3520	-	35,61	-
Presente trabalho Teste I	CHP60	68,54	32,90	18,55
Presente trabalho Teste II	CHP60	83,46	34,36	16,81
Presente trabalho Teste III	CHP60	92,33	36,77	17,20

Pode ser observando na Tabela 14, que a maior eficiência entre os motores utilizados por Xavier (2016), foi o modelo G3608, também pode ser observado os resultados na geração de energia elétrica apresentados por Coser et al. (2015) na Tabela 11, que aumenta conforme aumenta a potência do motor utilizado e também a concentração de metano no biogás. Essa relação corrobora com os resultados alcançados pelo presente trabalho, apresentados pela melhora na eficiência de geração de energia elétrica conforme aumenta o percentual de metano.

Trazendo os resultados apresentados na Tabela 9, pode ser observado que o aumento da eficiência acontece com o aumento do teor de metano, para a geração de energia elétrica, porém quando for considerado com a energia térmica, nota-se que há um decréscimo de eficiência, no Teste I, onde atingiu 68,54% de CH<sub>4</sub>, na qual poderia ter gerado 6,20 kWh/m<sup>3</sup>, foi alcançado geração total de 3,19 kWh/m<sup>3</sup>, entre energia térmica e elétrica, representando assim percentual de 51,45%, desse percentual, 32,90% foi na geração elétrica, e 18,55% de energia térmica.

No segundo teste, com a taxa de CH<sub>4</sub> alcançado foi de 83,46%, a energia que poderia ser extraída nessas condições era de 9,34 kWh/m<sup>3</sup>, mas o valor alcançado entre térmica e elétrica foi de 4,78 kWh/m<sup>3</sup>, representando 51,18%. Desse valor, foram

34,36% para energia elétrica e 16,81% de eficiência para geração de energia térmica, o que mostra divergência pela questão de purificação.

Para o terceiro teste, onde a purificação atingiu 92,33% de  $\text{CH}_4$ , a energia que poderia ser gerada era de  $9,71 \text{ kWh/m}^3$ , dessa geração foi alcançada  $5,24 \text{ kWh/m}^3$  mostrando eficiência de 53,97%. Na qual foram 36,77% para energia elétrica e 17,20% para energia térmica. O que justifica essa baixa geração de energia térmica e consequentemente ocasiona um decréscimo das eficiências, é o trocador de calor empregado no trabalho, que se resume em um tubo de aço galvanizado para a saída dos gases de escape, envolto apenas por um tubo camisa feito de aço carbono. Além da configuração geométrica de sua construção, também não havia chicanas em seu interior, e outro fator que contribuiu para os baixos resultados foi a questão do material de construção desse trocador de calor, sendo de baixa condutividade térmica em comparação a outros materiais existentes.

Fazendo-se uma breve análise para melhoria da eficiência, sabendo que não é possível alcançar 100% do aproveitamento de toda energia contida em um metro cúbico de biogás, por meio de um motor de combustão interna, porém, se conseguisse atingir percentuais em torno de 85% da eficiência total, possibilitaria alcançar resultados em torno de  $5,27 \text{ kWh/m}^3$ ,  $7,94 \text{ kWh/m}^3$ , e  $8,25 \text{ kWh/m}^3$  para os testes I, II e III respectivamente. Se alcançasse percentuais em torno dos 90% de eficiência total, os valores para os mesmos testes seriam de  $5,58 \text{ kWh/m}^3$ ,  $8,41 \text{ kWh/m}^3$ , e  $8,74 \text{ kWh/m}^3$ .

Esses dados reforçam ainda mais a necessidade do desenvolvimento de pesquisas que integrem o reaproveitamento de resíduos para geração de energia. Portanto, esta pesquisa intitulada “Avaliação da Eficiência Energética do Biogás com Diferentes Percentuais de Metano na Produção de Energia Térmica e Elétrica” vem ao encontro de pesquisas já realizadas, tendo como diferencial, além da produção de energia elétrica, também a quantificação da geração de energia térmica e ainda com concentrações de diferentes percentuais de metano.

## 5 CONCLUSÃO

Neste estudo, foram analisados aspectos a respeito da purificação do biogás e foi possível contemplar, pelas tecnologias empregadas e resultados obtidos, que existe probabilidade da difusão para o tratamento de biomassas residuais e obtenção do biogás com níveis de purificações elevados.

Na geração de energia elétrica, pode-se afirmar que o trabalho conquistou resultados semelhantes com relação a outras pesquisas, demonstrando pelos valores de geração possibilidade da utilização do biogás apenas dessulfurizado para essa finalidade.

Na questão do aproveitamento para geração de energia térmica, alcançaram-se valores que demonstram possibilidade de melhores resultados, em virtude principalmente da baixa condutividade térmica do material que foi construído o trocador de calor utilizado no trabalho, em comparação com outros materiais como alumínio, cobre, entre outros. Enfatizando, assim, possibilidades de melhores resultados se forem empregados equipamentos com certa superioridade de engenharia. Fica, nessa etapa do trabalho, possibilidade para futuras pesquisas em melhor aproveitamento dessa energia térmica, inclusive possibilidades para teses de doutorados.

Fazendo uma relação da eficiência atingida entre os testes realizados, pode se considerar que para a geração de energia elétrica, do Teste I para o Teste II teve um aumento de 57,35%, do Teste I para o III este aumento foi de 75,00% e do Teste II para o III teve aumento de 11,21%. Comparativamente, na geração de energia térmica o crescimento percentual do Teste I para II foi de 36,52%, do Teste I para III foi de



45,21%, e do Teste II para III de 6,37%.

Outra análise deste trabalho é o consumo de energia do sistema de purificação com relação ao que foi gerado em cada teste. No primeiro teste onde o biogás foi dessulfurizado, o sistema demandava 3,99 kWh de energia e a geração era de 26,05 kWh, apresentando necessidade de 15,31% da geração para consumo do sistema de dessulfurização. Para o segundo teste onde houve utilização parcial da PSA, a demanda do sistema foi de 4,02 kWh e foi gerado 32,34 kWh, representando ser utilizado para essa etapa 12,43% de energia na dessulfurização e purificação intermediária. O terceiro teste que foi empregado funcionamento total do sistema, sendo a dessulfurização e toda a PSA, a energia demandada no sistema foi de 4,05 kWh, e a energia gerada foi de 32,47 kWh, representando ser utilizado pelo sistema 12,47% da energia gerada. Representando um consumo relativamente irrelevante pelo sistema, em consideração os valores gerados e que estavam sendo empregados em outras finalidades pela planta piloto.

Dessa forma, os conceitos e resultados encontrados nessa pesquisa vem colaborar para execução de trabalhos dentro do cenário de utilização do biogás para fins energético, inclusive como embasamento para projetos em propriedades rurais ou industriais.

Outro assunto significativo, que foi uma limitação do presente estudo e pode ser utilizado para trabalhos futuros é a realização de análise financeira dessa técnica, demonstrando sua viabilidade para empresas e propriedades rurais.

## REFERÊNCIAS

ALMEIDA, S. C. A. de; FRANÇA, V. C. de; JUNIOR, L. M. Estudo de viabilidade técnica, econômica e ambiental de utilização de biodigestores em uma fazenda no recreio dos bandeirantes, set. 2008, Fortaleza. In: XII CONGRESSO INTERNACIONAL SOBRE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA E ENERGIA NO MEIO RURAL. **Anais...** Fortaleza, 2008.

AL SEADI, T.; RUTZ, D.; PRASSL, H.; KÖTTNER, M.; FINSTERWALDER, T.; VOLK, S.; JANSSEN, R. **Biogas Handbook**. Universidade do Sul da Dinamarca Esbjerg, Dinamarca, 2008.

ALVES, G. J. **Aplicação dos Sistemas de Informação Geográfica nas energias renováveis: o potencial de energia solar na ilha de São Vicente – Cabo Verde**. 2013. 91 f. Dissertação (2º Ciclo de Estudos em Sistemas de Informação Geográfica e Ordenamento do Território) – Faculdade de Letras, Universidade do Porto, Porto – Portugal, 2013.

ANEEL. Agência Nacional de Energia Elétrica. **Atlas de energia elétrica do Brasil**. 3. ed. Brasília: ANEEL, 2008.

\_\_\_\_\_. **Resolução Normativa nº 482, de 17 de abril de 2012**. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/cedoc/ren2012482>>. Acesso em: 05 jun. 2018.

ANP. Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. **Resolução Normativa nº 687, de 24 de nov. de 2015**. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/cedoc/ren2015687>>. Acesso em: 05 jun. 2018.

\_\_\_\_\_. **Resolução ANP nº 8, de 30 de Janeiro de 2015**. Disponível em: <<http://nxt.anp.gov.br/NXT/gateway.dll?f=templates&fn=default.htm&vid=anp:10.1048/enu>>. Acesso em: 02 ago. 2017.

\_\_\_\_\_. **Resolução ANP nº 685, de 29 de Junho de 2017**. Disponível em: <<https://www.legisweb.com.br/legislacao/?id=345545>>. Acesso em: 21 ago. 2017.

\_\_\_\_\_. **Produção e fornecimento de biocombustíveis**. Disponível em: <<http://www.anp.gov.br/wwwanp/producao-de-biocombustiveis>>. Acesso em: 21 ago. 2017.

ARCE, A. S. E. **Um Modelo de Otimização do Despacho de Máquinas em Usinas Hidrelétricas**. 1999. 75f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) –

Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1999.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PRODUTORES DE FLORESTAS PLANTADAS – ABRAF. **Anuário estatístico ABRAF 2013**. Ano base 2012. São Paulo: Brasília, 2012. p. 42-43.

AVELLAR, L. H. N. **A valorização dos subprodutos agroindustriais visando a cogeração e a redução da poluição ambiental**. 2001. 111f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Guaratinguetá, 2001.

BARRERA, Paulo. **Biodigestores: energia, fertilidade e saneamento para a zona rural**. 2. ed. São Paulo: Editora Ícone, 2003.

BAUER, F.; HULTEBERG, C.; PERSSON, T. Biogas upgrading: Review of commercial technologies. **Malmö**, Svenskt Gastekniskt Center AB, 2013. Disponível em: <[http://vav.griffel.net/filer/C\\_SGC2013-270.pdf](http://vav.griffel.net/filer/C_SGC2013-270.pdf)>. Acesso em: 02 jun. 2018.

BERTINOTTI, C. R. **Guia de cogeração e geração de energia elétrica a gás natural**. Programa P&D e C&R Ciclo 2014-2015. Gás Brasileiro – Gerência de Marketing e Atendimento ao Cliente (GEMAC), 2016. Disponível em: <[http://docplayer.com.br/15991220-Guia-de-cogerao-e-geracao-de-energia-eletrica-a-gas-natural-programa-p-d-e-c-r-ciclo-2014\\_2015.html](http://docplayer.com.br/15991220-Guia-de-cogerao-e-geracao-de-energia-eletrica-a-gas-natural-programa-p-d-e-c-r-ciclo-2014_2015.html)>. Acesso em: 17 ago. 2017.

BONATTO, I. C. **Remoção de H<sub>2</sub>S através de adsorção por carvão ativado**. 2013, 165 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Ambiental da Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2013.

BRASIL. Empresa de Pesquisa Energética – EPE. **Balanço Energético Nacional 2017: Ano base 2016**. Rio de Janeiro: EPE, 2017.

\_\_\_\_\_. **Lei nº 10.438, de 26 de abril de 2002**. Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (Proinfa). Disponível em: <[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/leis/2002/L10438.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/2002/L10438.htm)>. Acesso em: 02 ago. 2017.

\_\_\_\_\_. Empresa de Pesquisa Energética – EPE. **Balanço Energético Nacional 2018: Ano base 2017**. Rio de Janeiro: EPE, 2018.

\_\_\_\_\_. Ministério de Minas e Energia. **RenovaBio**. Disponível em: <<http://www.mme.gov.br/web/guest/consultas-publicas>>. Acesso em: 21 ago. 2017.

BRONZATTI, F. L.; NETO, A. I. Matrizes Energéticas no Brasil: Cenário 2010-2030. In: XXVIII ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 2008, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro, 2008, p. 15.

BUDZIANOWSKI, W. M.; BUDZIANOWSKA, D. A. Economic analysis of biomethane and bioelectricity generation from biogas using different support schemes and plant configurations. **Energy**, v. 88, p. 658-666, ago. 2015. Disponível em: <<https://www->

sciencedirect.ez316.periodicos.capes.gov.br/science/article/pii/S0360544215007070  
>. Acesso em: 07 fev. 2019.

CANEVER, V. B. **Estudo de filtragem de biogás para fins energéticos utilizando como método de filtragem lavador de gases de baixo custo**. 2017. 80 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Energia na Agricultura, Universidade Estadual do Oeste do Parana, Cascavel, 2017.

CARVALHO, B. C. **Desenvolvimento de modelo computacional de sistemas eólicos utilizando geradores síncronos para estudos de desempenho no contexto da qualidade da energia elétrica**. 2006. 213 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica), Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2006.

CAVICCHI, B. Sustainability that backfires: the case of biogas in Emili Romagna. **Envnvironmental Innovation and Societal Transitions**, v. 21, p. 12-27, dez. 2016. Disponível em:<<https://www.sciencedirect.com/search?qs=políticas%20do%20biog%C3%A1s&how=25&sortBy=relevance>> Acesso em: 21 jan. 2019.

CHP Brasil. **Produtos**. Site comercial. Disponível em: <<http://www.chpbrasil.com.br/produtos.html>>. Acesso em: 28 ago. 2017.

CNI. Confederação Nacional das Indústrias. **Matriz Energética: Cenários, Oportunidades e Desafios**. Disponível em:<[http://www.cni.org.br/portal/data/files/matriz\\_energetica](http://www.cni.org.br/portal/data/files/matriz_energetica)>. Acesso em: 14 nov. 2017.

COLDEBELLA, A. **Viabilidade do uso do biogás da bovinocultura e suinocultura para geração de energia elétrica e irrigação em propriedades rurais**. 2006. 74f. Dissertação (Mestrado em engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Universidade Estadual do Oeste do Paraná. Cascavel, 2006.

COLLIS, J.; HUSSEY, R. **Pesquisa em Administração: um guia prático para alunos de graduação e pós-graduação**. Tradução Lúcia Simonini. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2005.

COMPANHIA PARANAENSE DE ENERGIA, FONTES DE ENERGIA – COPEL. **Biomassa**. 2011. Disponível em: <<http://www.copel.com/hpcopel/root/nivel2.jsp?endereco=%2Fhpcopel%2Fgeracao%2Fpagcopel2.nsf%2Fdocs%2F24349F1A246428E1032574240049F201>>. Acesso em: 15 jan. 2019.

COSER, F.; DIAS, C. P.; LEITÃO, F. O.; MEDEIROS, S. A. de.; OLIVEIRA, P. A. V. de. Potencial para geração de energia elétrica, com o uso do biogás gerado, na suinocultura brasileira, out. 2015, Campinas. São Paulo, In: XVII CONGRESSO ABRAVES – Suinocultura em Transformação. **Anais...** Campinas, 2015.

COSTA, R. A.; CASOTTI, B. P.; AZEVEDO, R. L. S. **Um panorama da indústria de bens de capital relacionados á energia eólica**. Rio de Janeiro: BNDS Setorial,

2009.

CPFL ENERGIA. **Energia Eficiente – Uso consciente**. Disponível em: <<https://www.cpfl.com.br/energias-sustentaveis/eficiencia-energetica/uso-consciente/historia-da-energia>>. Acesso em: 24 out. 2017.

DELGADO, R. F. L. **Estudo e implementação de um sistema de cogeração**. 2016. 223 f. Dissertação (Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia de Universidade do Porto, Portugal, 2016.

FUNDAÇÃO ESTADUAL DE MEIO AMBIENTE – FEAM. **Guia técnico ambiental de biogás na agroindústria**. Belo Horizonte: Fundação Estadual do Meio Ambiente, Federação das Indústrias do Estado de Minas Gerais, Cooperação Alemã para o Desenvolvimento Sustentável (GIZ), 2015.

FERRAZ, J. M. G.; MARIEL, I. E. **Biogás uma fonte Alternativa de Energia**. Brasil, 1980.

FERREIRA, A. C. Estudo comparativo da troca térmica em trocadores de calor dos tipos casco-tubos e de placas. **Unoesc & Ciência – ACET**, Joaçaba, p. 57-66, 2014.

FILHO, A. V. O Brasil no Contexto Energético Mundial. **Naippe**, São Paulo, v. 6, 2009.

FILHO, M. G., SIQUEIRA, L. M., COROTO, R., KONRAD, O. Análise das emissões atmosféricas, rendimento e nível de ruído em ônibus movido a biometano – um estudo de caso. **Centro Científico Conhecer – Enciclopédia Biosfera**, v. 14, nº. 26, p. 8, dez. 2017. Disponível em: <<http://www.conhecer.org.br>>. Acesso em: 22 jan. 2019.

FREITAS, F. F. et al. The Brazilian Market of distributed biogas generation: Overview, technological development and case study. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 101, p. 146-157, mar. 2019. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032118307391>>. Acesso em: 21 jan. 2019.

FURTADO, J. G. de M.; SERRA, E. T. Avaliação Tecnológica Sobre a Geração de Energia Elétrica Apartir de Resíduos Sólidos Urbanos. In: XX SNPTEE SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA, 2009, Recife. **Anais...** Recife, 2009.

GALAVERNA, R.; PASTRE, J.C. Produção de 5-Hidroximetil furfural a partir de Biomassa: Desafios Sintéticos e Aplicações com Blocos de Construção na Produção de Polímeros e Combustíveis Líquidos. **Revista Virtual de Química**, v.9, n. 1, p. 248-273, 2017.

GENOVESE, A. L.; UDAETA, M. E. M.; GALVÃO, L. C. R. Aspectos energéticos da biomassa como recurso no Brasil e no mundo. In: ENCONTRO DE ENERGIA NO MEIO RURAL, 6., 2006, Campinas. **Anais...** Campinas, 2006. p. 10.

GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 5. ed. São Paulo: Atlas, 2010.

GUERRA, J. B. S. O. A.; DUTRA, L.; SCHWINDEN, N. B. C.; ANDRADE, S. F. Future scenarios and trends in energy generation in brazil: supply and mitigation forecasts. **Journal of Cleaner Production**, v. 103, p. 197-210, set. 2015. Disponível em: <<https://www-sciencedirect.ez316.periodicos.capes.gov.br>>. Acesso em: 19 jan. 2019.

HENRIQUES, R. M. **Aproveitamento Energético dos Resíduos Sólidos Urbanos: Uma Abordagem Tecnológica**. 2004. 190f. Dissertação (Mestrado em Ciências em Planejamento Energético) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2004.

HIBBELER, R. C. **Dinâmica: mecânica para engenharia**. 12. ed. São Paulo: Pearson, 2011.

HOTTA, S. K.; SAHOO, N.; MOHANTY, K. Comparative assessment of a spark ignition engine fueled with gasoline and raw biogas. **Renewable Energy**, v. 134, p. 1307-1319, abr. 2019. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148118311121>>. Acesso em: 22 jan. 2019.

ICLEI. **Manual para aproveitamento do biogás – Efluentes urbanos**. Governos Locais pela Sustentabilidade, Secretariado para América Latina e Caribe, Escritório de projetos no Brasil, v. 2. São Paulo, 2010.

INCROPERA, Frank P. et al. **Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa**. 6. ed. Rio de Janeiro: Ltc – Livros Técnicos e Científicos Editora S. A, 2008. 643 p.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY – IEA. **Coal falls as gas rises: World energy balances in 2016**. Disponível em: <<https://www.iea.org/newsroom/news/2017/august/coal-falls-as-gas-rises-world-energy-balances-in-2016.html>>. Acesso em: 09 ago. 2017.

KARLSSON, T. et al. **Manual Básico de Biogás**. Lajeado: Editora da Univates, 2014.

KHAYUM, N.; ANBARASU, S.; MURUGAN, S. Biogas potential from spent tea waste: A laboratory scale investigation of co-digestion with cow manure. **Energy**, v. 165, p. 760-768, dez. 2018. Disponível em: <<https://www-sciencedirect.ez316.periodicos.capes.gov.br/science/article/pii/S0360544218319352>>. Acesso em: 08 fev. 2019.

KEMP, R.; FOXON, T. J. **Tipology of eco-innovation**. MEI project: measuring eco-innovation. European Commission, 2007.

KIM, Y. J., NAM, Y. S., KANG, Y. T. Study on a numerical model and PSA (pressure swing adsorption) process experiment for CH<sub>4</sub>/CO<sub>2</sub> separation from biogas. **Energy**, v. 91, p. 732-741, nov. 2015. Disponível em:

<<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544215011627>>. Acesso em: 21 jan. 2019.

KONRAD, O. et. al. **Atlas das biomassas do RS para produção de biogás e biometano**. Lajeado: Editora da Univates, 2016.

KREITH, F.; MANGLIK, R. M.; BOHN, M. S. **Princípios de Transferência de Calor**. 7. ed. São Paulo: Cengage Learning, 2014. 594 p.

LANTZ, M. et. al. The prospects for an expansion of biogas systems in Sweden-Incentives, barriers and potentials. **Energy Policy**, v. 35, p. 1830-1843, mar. 2007. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.ez316.periodicos.capes.gov.br>>. Acesso em: 12 dez. 2018.

MACHADO, D. O. **Análise de desempenho de um motor ciclo Otto com biogás**. 2014. 84f. Dissertação (Mestrado) – Universidade do Vale do Rio dos Sinos, Programa de Pós – Graduação em Engenharia Mecânica, São Leopoldo, 2014.

MARTINEZ, D. G; KITAMURA, D. S; SILVA, F. P; SOUZA, S. M. N; BASTOS, R. K; SOUZA, C. R. B. Geração de energia elétrica a partir do biogás. **Brazilian Journal of Biosystems Engineering**, v. 7, n. 1, p. 45-54, 2013.

MARTINS, F. R.; GUARNIERI, R. A.; PEREIRA, E. B. O aproveitamento da energia eólica. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 30, n. 1, p.1304-1–1304-13, 2008.

MELLO, V. M.; SANTOS, D. D. L.; FREITAS, R. C. S.; YOKOYAMA, L.; CAMMAROTA, C. Energy generation in the treatment of effluent from washing of municipal solid waste collection trucks. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, v. 30, p. 105-113, Dez. 2018. Disponível em:< <https://www-sciencedirect.ez316.periodicos.capes.gov.br/science/article/pii/S2213138816301035> > Acesso em: 29 abr. 2019.

MENKES, M. **Eficiência energética, políticas públicas e sustentabilidade**. 2004. 295 f. Tese (Doutorado em Desenvolvimento Sustentável) – Centro de Desenvolvimento Sustentável, Universidade de Brasília, Brasília, 2004.

MIYAWAKI, B. **Purificação de biogás através de cultivo de microalgas em resíduos agroindustriais**. 2014. 137 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência dos Materiais) – Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2014.

MONTEIRO, S. D. da S. C. **Produção de biometano: análise de mercado e estudo da separação por PSA**. 2011. 55 f. Dissertação (Mestrado Integrado em Engenharia Química) – Universidade do Porto, Portugal, 2011.

MORAIS, L. C. **Estudo Sobre o Panorama da Energia Elétrica no Brasil e Tendências Futuras**. 2015. 136 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Bauru, 2015.

NASCIMENTO, T. C.; MENDONÇA, A. T. B. B.; CUNHA, S. K. Inovação e sustentabilidade na produção de energia: o caso do sistema setorial de energia eólica no Brasil. **EBAPE BR**, Rio de Janeiro, v. 10, n. 3, set. 2012.

NIESNER, J.; JECHA, D.; STEHLIK, P. Biogas upgrading technologies: State of art review in european region. **Chemical Engineering Transactions**, v. 35, p. 517-522, jun 2016.

NOZIC, Misarda. **Removal of carbon dioxide from biogas**. Departament of Chemical Engineering. Sweden: Lund University, 2011.

OBSERVATÓRIOS SISTEMA FIEP. **Oportunidades da cadeia produtiva de biogás para o estado do Paraná**. Curitiba: Senai/PR, 2016.

PECORA, V. **Implantação de uma unidade demonstrativa de geração de energia elétrica a partir do biogás de tratamento do esgoto residencial da USP – Estudo de Caso**. 2006. 153f. Dissertação (Mestrado em Energia) – Programa Interunidades de Pós-Graduação em Energia – PIPGE, Instituto de Eletrotécnica e Energia (IEE) da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

PERECIN, D. **Comparação entre as estratégias de aproveitamento energético do biogás: geração de energia elétrica versus produção de biometano**. 2017. 167f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós Graduação em Energia - Instituto de Energia e Ambiente da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2017.

PINHEIRO, S. M. V. **Implementação e avaliação de desempenho de sistema de aproveitamento de energia contida nos gases de escape de veículos automóveis**. 2015. 132 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Automóvel) – Escola Superior de Tecnologia e Gestão, Instituto Politécnico de Leiria, Leiria, 2015.

PIPATMANOMAI, S. KAEWLUAN, S. VITIDSANT, T. Economic assessment of biogas-to-electricity generation system with H<sub>2</sub>S removal by activated carbon in small pig farm. **Applied Energy**, v. 86, p. 669-674, mai. 2009. Disponível em: <[https://www-sciencedirect.ez316.periodicos.capes.gov.br/science/article/pii/S0306261908001761](https://www.sciencedirect.ez316.periodicos.capes.gov.br/science/article/pii/S0306261908001761)> Acesso em: 16 out. 2018.

PRATI, L. **Geração de energia elétrica a partir do biogás gerado por biodigestores**. 2010. 83f. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) – Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2010.

PUCRS. **USE – Uso Sustentável da Energia**: Manual de Economia de Energia. 2010. 28f. Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul. Faculdade de Engenharia. Grupo de Eficiência Energética. Disponível em: <<http://www.pucrs.br/biblioteca/manualuse.pdf>>. Acesso em: 24 out. 2017.

RECALDE, M. Y.; BOUILLE, D. H.; GIRARDIN, L. O. Limitaciones para el desarrollo de energías renovables en Argentina. **Problemas del Desarrollo**, v. 46, p. 89-115, dez. 2015. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/search?q=políticas%20de%20biog%C3%A1s&show=25&sortBy=relevance&offset=0>>. Acesso em: 21 jan. 2019.



REIS, S. **Análise de viabilidade técnica e econômica de central de cogeração numa indústria de torneiras**. 2016. 59f. Dissertação (Mestrado em Gestão) – Universidade Aberta, Lisboa, 2016.

RODRIGUES, F. F. C. **Programação da contratação de energia considerando geração distribuída no novo modelo do setor elétrico brasileiro**. 2006. 171f. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Elétrica) – Programa de Pós Graduação de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.

RODRIGUES, T. O. **Efeitos da Torrefação no Condicionamento de Biomassa para Fins Energéticos**. 2009. 82f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Departamento de Engenharia Florestal, Universidade de Brasília, Brasília, 2009.

ROSSETO, C. **Desempenho de moto-gerador de ciclo otto operando com gasolina e biogás proveniente de suinocultura e de uma estação de tratamento de esgoto**. 2014, 143 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós Graduação em Energia na Agricultura da Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavél, 2014.

ROUQUEROL, F. et al. **Adsorption by powders and porous solids: principles, methodology and applications**. 2. ed. London: Academic Press, 2013.

ROURKE, O. F.; BOYLE, F.; REYNOLDS, A. Applied Energy: Tidal energy update 2009. **Elsevier**, Dublin, v. 87, n. 2, p. 389-409, 2010.

SALAZAR, A. R. G. **Estudo da utilização do biogás como fonte de energia renovável no processo produtivo de indústrias de bebidas**. 2014. 152f. Dissertação (Mestrado em Eficiência Energética e Sustentabilidade) – Faculdades de Engenharia, Arquitetura e Urbanismo e Geografia, Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, Campo Grande, 2014.

SALOMON, K. R.; LORA, E. E. Estimate of the electric energy generating potential for different sources of biogas in Brazil. **Biomass and Bioenergy**, v. 33, p. 1101-1107, set. 2009. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S096195340900052X>>. Acesso em: 22 jan. 2019.

SANTOS, E. L. B.; JUNIOR, G. N. Produção de biogás a partir de dejetos de origem animal. **Techne e Logos**, v. 4, n. 2, p. 80-90, Ago. 2013.

SANTOS, F. H. G.; NASCIMENTO, S. R.; ALVES, M. G. Biomassa como energia renovável no Brasil. **Uninga Review**, Maringá, v. 29, n. 2, p. 06-13, 2017.

SANTOS, P. **Guia técnico de biogás**. Amadora/Portugal: 2000. CCE – Centro para a Conservação de Energia. AGEEN – Agência para a Energia. p.117.

SAUER, I. L. et al. Energias renováveis: ações e perspectivas na Petrobras. **Revista Bahia Análise & Dados**, Salvador, v. 16, n. 1, p. 9-22, jun. 2006

SAVEDRA, O. R. **Potencial Energético do Maranhão: Energias Oceânicas**. São Luiz: Universidade Federal do Maranhão, 2016.

SGANZERLA, E. **Biodigestor**: uma solução. Porto Alegre, 1983.

SILVA, C. B. da. **Abordagem teórica do processo de geração de biometano a partir de resíduos agroindustriais**. 2017. 69 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, 2017.

SILVESTRE, V. V. **Levantamento do potencial de geração de biogás de aterro sanitário para o aproveitamento sob a forma de energia elétrica**. 2015. 117f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós – Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2015.

SIMIONI, C. A. **O uso de energia renovável sustentável na matriz energética Brasileira: obstáculos para o planejamento e ampliação de políticas sustentáveis**. 2006. 314f. Tese (Doutorado) – Programa de Doutorado em Meio Ambiente, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2006.

SOUZA, W. N. T.; MANZELA, A. A. **Otimização de desempenho de trocadores de calor compactos**. Revista de Engenharia da Faculdade Selesiana, n. 1, p. 33-34, 2015. Disponível em: <[http://www.fsma.edu.br/RESA/Edicao1/FSMA\\_RES\\_2015\\_1\\_03.pdf](http://www.fsma.edu.br/RESA/Edicao1/FSMA_RES_2015_1_03.pdf)>. Acesso em: 23 jan. 2019.

SOUZA, R. G. **Desempenho do conjunto motogerador adaptado a biogás**. 2006. 52f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola, Máquinas e Automação Agrícola) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2006.

SUMIONI, C. A. **O uso de energia renovável sustentável na matriz energética brasileira: obstáculos para o planejamento e ampliação de políticas sustentáveis**. 2006. 314f. Tese (Doutorado em Meio Ambiente e Desenvolvimento) – Programa de Doutorado em Meio Ambiente e Desenvolvimento da UFPR, Curitiba, 2006.

SUZUKI, A. B. P. et al. Uso de biogás em motores de combustão interna. **Revista Brasileira de Tecnologia Aplicada nas Ciências Agrárias**, v. 4, n. 1, p. 221–237, 2011.

SWEDISH GAS CENTRE (SGC). **Basic data on biogas**. 2. ed. Malmö/Suécia: 2012.

TAVARES, Wagner Marques (Coord.). **Energias renováveis: riqueza sustentável ao alcance da sociedade**. Relator Pedro Uczai. Equipe técnica Alberto Pinheiro de Queiroz Filho. Brasília: Câmara dos Deputados, Edições Câmara, 2012. 275 p. (Série Cadernos de Altos Estudos, 10). Disponível em: <<http://www2.camara.leg.br/a-camara/altosestudios/pdf/energias-renovaveis-riqueza-sustentavel-ao-alcance-da-sociedade>>. Acesso: 16 nov. 2017.

TOLMASQUIM, Mauricio T.; GUERREIRO, Amilcar; GORINI, Ricardo. Matriz energética brasileira. **Revista Novos Estudos CEBRAP**, n. 79, nov. 2007, p. 47-69.

VEIGA, A. P. B. **Contribuição à avaliação das barreiras e oportunidades regulatórias, econômicas e tecnológicas do uso de biometano produzido a partir de gás de aterro no Brasil**. 2016. 173 f. Dissertação (Mestrado em Energia) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2016.

VIANA, M. B.; TAVRES, W. M.; LIMA, P. C. R. **Sustentabilidade e as principais fontes de energia**. Câmara dos Deputados. Brasília, 2015.

WERNCKE, I. **Desempenho energético de um motor gerador de 5 kVA operando no modo dual com diesel, biodiesel de crambe e biogás**. 2014. 60f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná. Programa de Pós-Graduação *Stricto Sensu* em Energia na Agricultura, Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas. Cascavel, 2014.

WHITING, A., AZAPAGIC, A. Life cycle environmental impacts of generating electricity and heat from biogas produced by anaerobic digestion. **Energy**, v. 70, p. 181-193, jun. 2014. Disponível em: <<https://www-sciencedirect.ez316.periodicos.capes.gov.br/science/article/pii/S0360544214003673>>. Acesso em: 07 fev. 2019.

XAVIER, B. H. **Aspectos termodinâmicos, ecológicos e econômicos de sistemas de cogeração com motores de combustão interna operando com gás natural, biogás e gás de síntese**. 2016. 117f. Dissertação (Mestrado) Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá. Guaratinguetá, 2016.

YINGJIAN, L; QI, Q; XIANGZHU, H; JIEZHI, L. Energy balance and efficiency analysis for power generation in internal combustion engine sets using biogas. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, v. 6, p. 25-33, Jun. 2014. Disponível em:<<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2213138814000046#!>> Acesso em: 24 abr. 2019.

ZHAO, Q. Purification Technologies for biogas generated by anaerobic digestion. **CSANR Research Report**. 2010. Disponível em: <<http://csanr.wsu.edu/wp-content/uploads/2013/02/CSANR2010-001.Ch09.pdf>>. Acesso em: 02 jun. 2018.